annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (1), 1-18.

ÉTUDE PHYSIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LES CONDITIONS NATURELLES

I. — ÉVAPORATION ET BILAN D'ÉNERGIE DES SURFACES NATURELLES

A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'omniprésence de l'eau à tous les niveaux du système terrestre et son importance vitale dans tous les secteurs de la biologie confèrent à cet élément une place de marque qui le situe au centre des préoccupations de bien des spécialistes. Cet intérêt, loin de s'estomper, ne fait que croître, en particulier dans le domaine de l'évaluation des quantités en eau, depuis que les sociétés modernes voient augmenter toujours plus rapidement leurs besoins en eau. La consommation croissante, à des fins agricoles, industrielles et ménagères, crée de façon très inégale un déficit dans l'approvisionnement, si crucial même pour certaines régions. La seule vraie perte en eau au cours d'un cycle d'utilisation est due à la vaporisation, qui intéresse la plus grande partie des eaux utilisées en agriculture et certaines utilisées dans l'industrie ; quant aux autres utilisations industrielles et à la consommation ménagère, elles n'occasionnent qu'une fixation momentanée ou une pollution.

A l'échelle d'une région quelconque, en dehors des pertes par débit liquide superficiel ou souterrain hors de cette région, l'évaporation constitue la partie réellement perdue, par passage de la forme liquide de l'eau à sa forme vapeur — c'est une vaporisation naturelle — vapeur qui diffuse et se dilue dans l'atmosphère.

Ce phénomène de vaporisation se produit partout au niveau de toute interface entre un corps plus ou moins humide et l'air, à l'exception de situations où le phénomène inverse de condensation se produit à la surface des corps, la nuit notamment. Ainsi, l'ensemble des surfaces terrestres et plus particulièrement les étendues d'eau et les surfaces cultivées qui représentent le plus souvent un couvert biologique dense et riche en eau — cultures ou forêts — consomment la plus grande partie des quantités d'eau qu'elles reçoivent (pluviométrie, irrigation). Aussi l'analyse de l'évaporation ou des pertes préoccupe depuis longtemps les agronomes, les hydrologues et les océanographes, tout changement de la valeur de ce terme pouvant provoquer des variations considérables dans le bilan annuel des quantités d'eau.

Cette étude de l'évaporation des surfaces sera présentée en trois parties dont les deux dernières constitueront des articles présentés dans les prochains numéros :

I. — *Évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles.* Un rappel sur les lois simples concernant les transferts de masse et d'énergie permet de définir les interactions entre les facteurs climatiques déterminants, les facteurs physiques propres à la surface et les tensions de surface ou termes d'équilibre qui sont la température de surface et la concentration en vapeur d'eau en équilibre avec la surface. Cette analyse conduit à une définition générale de l'évapotranspiration potentielle dont l'expression, pour une surface dont l'interface avec l'air est assimilable à un plan (peu de développement vertical des surfaces d'échange), est une expression voisine de celle de PENMAN.

II. — *Expression et paramètre donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince » et ses tensions de surface.*

III. — *Expression et paramètre donnant l'évapotranspiration réelle et potentielle d'un couvert avec fort développement vertical.*

1re PARTIE

ÉVAPORATION ET BILAN D'ÉNERGIE DES SURFACES NATURELLES

RÉSUMÉ

A partir des relations de base décrivant les échanges et le bilan d'énergie, une présentation de l'évapotranspiration réelle et potentielle est faite en vue de souligner l'action des différents paramètres indépendants, regroupés ici en quatre rubriques. Les hypothèses de base et certains liens entre les paramètres sont rappelés afin de permettre une analyse plus détaillée de l'évapotranspiration dans les deux chapitres suivants.

LISTES DES SYMBOLES (I)

A	Énergie consommée par la photosynthèse (W m^{-2})
a	Albedo de la surface considérée
C	Concentration en vapeur d'eau dans l'air (kg m^{-3})
Ca	Concentration au niveau z_R de référence (kg m^{-3})
Cs	Concentration au niveau de la surface (kg m^{-3})
c	Coefficient d'échange radiatif : $4\ \varepsilon\sigma T^3$ (W m^{-2} $°C^{-1}$)
c_p	Chaleur massique de l'air (J kg^{-1} $°C^{-1}$)
c_{ps}	Chaleur massique du corps formant la surface (J kg^{-1} $°C^{-1}$)
γ	Constante psychrométrique (Pa $°C^{-1}$)

γ_r Rapport entre coefficients d'échange radiatif et convectif (Pa °C^{-1})

D Hauteur de déplacement du plan de référence (m)

E_a Évaporation de la surface si elle était à la température de l'air T_a (W m^{-2})

ETP_o Évaporation potentielle de la surface en valeur absolue ($-\Phi_L$)

e Coefficient de rétention de l'eau à la surface.

ε Émissivité de la surface

ε' Facteur d'absorption pour le rayonnement atmosphérique

$f(T)$ Fonction de la température

Φ_L Densité de flux de chaleur latente (W m^{-2})

Φ_{Lo} Densité de flux de chaleur latente pour une évaporation potentielle (W m^{-2})

Φ_s Densité de flux de chaleur sensible (W m^{-2})

Φ_c Densité de flux de chaleur par conduction à la surface du sol (W m^{-2})

$g(t)$ Fonction sinusoïdale du temps $\left(\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)\right)$

H Coefficient d'échange convectif de masse (m s^{-1})

H_o Cœfficient d'échange égal à $\frac{LM}{RT}H$ (m s^{-1})

h Coefficient d'échange convectif de chaleur (m s^{-1})

h_o Coefficient d'échange égal à $\rho\, c_p h$(W m^{-2} °C^{-1})

k Constante de Karman (0,39)

L Chaleur latente de vaporisation ($2{,}46 \cdot 10^6$ J kg^{-1})

λ_s Conductivité thermique du corps au voisinage de la surface (W m^{-1} °C^{-1})

M Masse molaire de l'eau ($18 \cdot 10^{-3}$, kg Mole^{-1})

P(T) Tension de vapeur saturante pour la température T (Pa)

P′ Dérivée de l'expression précédente pour $(T_s + T_r)/2$ (Pa °C^{-1})

R Constante des gaz parfaits (8,32)

Ra Rayonnement atmosphérique (densité de flux radiatif) (W m^{-2})

Rg Rayonnement global (densité de flux) (W m^{-2})

Rn Rayonnement net réel pour la surface considérée dans un état donné (densité de flux) (W m^{-2})

Rn_* Rayonnement net « de référence climatique » (W m^{-2})

r_o Résistance à la diffusion vapeur à travers la surface (s m^{-1})

ρ Masse volumique de l'air (kg m^{-3})

ρ_s Masse volumique du corps au voisinage de la surface (kg m^{-3})

σ Constante de Stefan-Boltzman ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} °K^{-4})

T Température en °K

T_a Température de l'air au niveau de référence (°K)

T_r Température du point de rosée de l'air au niveau de référence (°K)
T_{rs} Température du point de rosée de l'air à la surface (°K)
T_s Température de la surface (°K)
T_{so} Température de la surface quand il y a ETP_o (°K)
t Temps (s)
τ Période de l'évolution du flux de chaleur par conduction à la surface (s)
u_a Vitesse de l'air au niveau de référence (m s^{-1})
u_* Vitesse de frottement pour la surface considérée (m s^{-1})
z Hauteur considérée au-dessus du sol (m)
z_h Hauteur du couvert (m)
z_R Hauteur de référence dans l'air (m)
z_o Rugosité de la surface considérée (m)
θ Amplitude thermique (°C) pour $z = 0$
Θ_s Humidité pondérale du corps au voisinage de la surface.

1. — ÉVAPORATION ET ÉVAPOTRANSPIRATION

L'évaporation représente la quantité d'eau qui, par le processus de vaporisation, se trouve dissipée dans l'atmosphère et perdue pour le domaine considéré (kg m^{-2} s^{-1} ou mm j^{-1} ou en énergie W m^{-2}).

Ce phénomène naturel ou encore « passif » de vaporisation au niveau de toutes les surfaces inertes (sol ou plan d'eau) comme des surfaces biologiques (plantes, animaux) présente cependant une différence marquante suivant ces deux types de surfaces.

En effet, si l'on considère une surface inerte donnée, l'évaporation de cette surface sera parfaitement définie, et par conséquent toujours identique, si les conditions extérieures énergétiques et mécaniques sont les mêmes ainsi que l'état hydrique de la surface. Cette bonne reproductibilité de la valeur de l'évaporation, indispensable à une définition opérationnelle, se trouve malheureusement mise en défaut avec les surfaces biologiques qui présentent toujours des systèmes de régulation très variés ; en outre, ces systèmes évoluent au cours du temps aussi bien dans leur structure que leur régulation. Aussi l'état biologique des plantes ou des animaux va conditionner, de façon souvent prépondérante, la valeur de l'évaporation des surfaces, toute autre condition restant par ailleurs égale (Monteith, 1965). Ainsi les pertes en eau d'une plante dans le même état hydrique et placée dans les mêmes conditions seront multipliées par dix si les stomates passent d'un état quasi fermé à un état largement ouvert. De même, un sujet humain pourra dans les mêmes conditions ambiantes, suivant son état émotionnel, voir ses pertes en eau doubler. C'est pourquoi, dans le cas de surfaces biologiques, l'évaporation qui ne dépend pas seulement de l'état physique du milieu interne ou externe, est de préférence appelée transpiration.

Dans les conditions naturelles, chaque fois qu'il y a un couvert végétal plus ou moins continu, on utilise donc le terme d'évapotranspiration qui rappelle le terme

d'évaporation propre à la surface du sol, et celui de transpiration relatif aux végétaux. Mais ce terme d'évapotranspiration et la valeur de densité de flux (kg m^{-2} s^{-1}) qui lui est attachée resteraient sans intérêt si leur variabilité était par trop aléatoire. En effet, de cette constatation naissent deux réflexions importantes qui vont sous-tendre une partie de cette analyse :

— d'une part, la nécessité de paramétrer les états biologiques compte tenu du fait que certains types de réaction, d'adaptation et finalement d'état sont plus probables que d'autres, et que les évolutions de l'évapotranspiration sont progressives et plus ou moins reproductibles ;

— d'autre part, la tentative constante de ramener l'évapotranspiration, très variable en fonction de paramètres biologiques, à un terme standard d'évapotranspiration liée à des conditions biologiques particulières bien définies donc reproductibles, qui, à la limite, conduiraient à une définition physique et à une grandeur stable de référence de l'évapotranspiration : ce sera généralement l'évapotranspiration potentielle (voir § 3).

C'est cette dernière préoccupation qui a conduit de nombreux auteurs à préconiser des mesures simples plus ou moins arbitraires d'évaporation particulière (modèle physique tel que le Piche sous abris ou le bac d'évaporation, et un modèle biologique comme l'évapotranspiration d'un gazon) ; mesures particulières qui, par corrélation, en une région donnée et pour un couvert, peuvent être reliées à l'évapotranspiration moyenne de ce couvert.

Quoi qu'il en soit, l'évaporation d'une surface ou l'évapotranspiration d'un couvert correspondent à un même phénomène physique, celui d'un flux de masse de vapeur d'eau en provenance d'eau liquide vaporisée au voisinage de la surface. Cette vaporisation reste aussi sous la dépendance directe des phénomènes énergétiques puisque l'évaporation d'un kilogramme d'eau par mètre carré ou d'un millimètre d'eau représente environ $2{,}46 \cdot 10^6$ J (valeur de la chaleur latente de vaporisation de l'eau), soit à peu près ce que fournit, au niveau du sol, le soleil pendant une heure ($2{,}5 \cdot 10^6$ J m^{-2}), si l'on retient comme valeur de l'énergie au sol la moitié de la constante solaire (soit $1400/2 \simeq 700$ W m^{-2}, valeur couramment rencontrée en été sous latitude moyenne).

Quant à l'analyse de l'évapotranspiration, elle doit donc passer par une recherche d'expressions traduisant d'une part les termes énergétiques et l'intensité des échanges, et d'autre part les paramètres biologiques permettant d'interpréter les différents états biologiques. Alors seulement, une analyse des mesures ponctuelles sur certains types de couvert pourra s'élaborer et éventuellement permettre une extrapolation à d'autres couverts des valeurs trouvées malgré la grande variabilité de l'évapotranspiration.

2. — RELATIONS DE BASE ET BILAN D'ÉNERGIE

Il est important de préciser que les relations qui vont suivre s'appliquent à tout système qui, quelles que soient son hétérogénéité verticale et sa dimension, présente une certaine homogénéité horizontale. Dans ces conditions, ce système doit pouvoir se schématiser par deux plans parallèles ou interface (fig. 1) :

— un premier plan supérieur ou interface avec le milieu air,
— un second plan inférieur ou interface avec un milieu semi-infini sol ou eau.

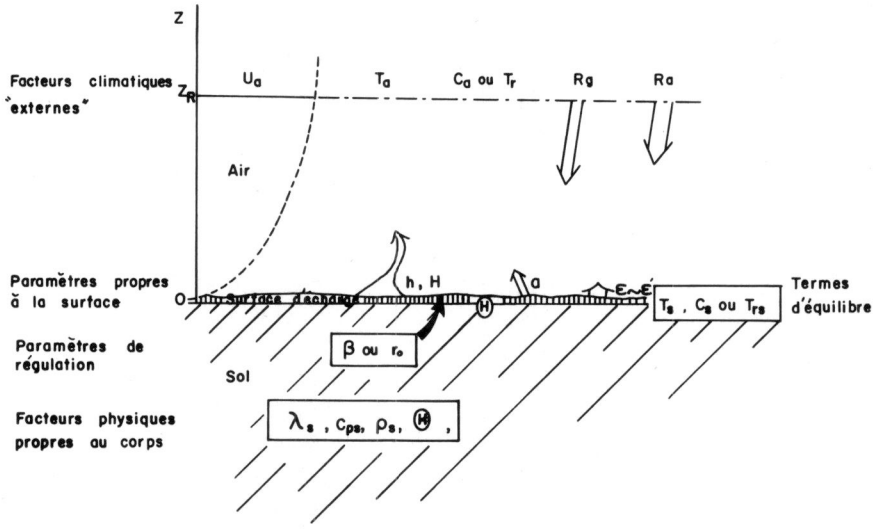


FIG. 1. — *Schéma descriptif des éléments intervenant dans le bilan d'énergie d'une surface*

— Les facteurs climatiques « externes » : U_a, la vitesse du vent ; T_a, sa température ; C_a ou T_r, sa concentration en vapeur d'eau ou sa température de point de rosée ; Rg, le rayonnement global ; Ra, le rayonnement atmosphérique.
— Les paramètres propres à la surface : h et H, les coefficients d'échanges de chaleur et de masse entre la surface et le niveau z_R ; Θ_s, l'humidité pondérale d'équilibre à la surface ; a, l'albédo ; ε, l'émissivité et ε', le facteur d'absorption du rayonnement atmosphérique.
— Les paramètres de régulation : e, coefficient de rétention de l'eau à la surface ; r_o, résistance à la diffusion entre la profondeur et la surface.
— Les facteurs physiques propres au corps : λ_s, la conductivité thermique ; c_{ps}, la chaleur massique ; ρ_s, la masse spécifique ; Θ, l'humidité pondérale.
— Les termes d'équilibres : T_s, la température de surface ; C_s ou T_{rs}, la concentration en vapeur d'eau ou la température du point de rosée de l'air à la surface.

Cependant, dans ces conditions, certaines approximations concernant le régime permanent au niveau de l'équation du bilan d'énergie ne sont pleinement valables que dans le cas d'un système mince (faible développement vertical) pour lequel la variation d'énergie ou de masse au sein du système considéré devient toujours négligeable. Ceci correspond évidemment au cas d'un gazon ou de l'infime couche de matière considérée au voisinage de la surface d'un sol ou d'une nappe d'eau libre ; cela peut l'être encore au niveau de certaines cultures, mais ne l'est plus au niveau d'une forêt, et une correction due à la variation de masse et d'énergie doit alors être introduite.

Enfin, il est important de préciser que les tensions d'équilibre (T_s, la température de surface et Cs la concentration en vapeur d'eau à la surface) se réferrent à l'interface système-air (plan supérieur) et par conséquent ne correspondent et ne sont assimilables aux vraies caractéristiques de surface que dans le cas d'un système mince, donc homogène, cas d'une nappe d'eau libre, d'un sol nu ou par extension d'un gazon (chap. II).

A. — *Évapotranspiration de la surface*

En régime permanent — pas d'accumulation de vapeur au sein de la tranche considérée ou du couvert — toute vaporisation de l'eau conduit à un flux vapeur à l'interface avec l'air. En écrivant la relation la plus simple, en terme d'énergie ($W\ m^{-2}$), l'évapotranspiration s'écrira :

$$\Phi_L = LH\ (C_a - C_s) \qquad (1)$$

où C_a est la concentration en vapeur d'eau dans l'air ($kg\ m^{-3}$) au niveau de référence climatique, z_R ; C_s est la concentration en vapeur d'eau au niveau de l'interface de la tranche considérée avec l'air ;

H est le coefficient d'échange de masse ($m\ s^{-1}$) pour la surface considérée, compte tenu de la turbulence de la masse d'air ;

Φ_L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2{,}46 \cdot 10^6\ J\ kg^{-1}$).

Cette relation ne devient opérationnelle que dans la mesure où ces différents termes peuvent être appréhendés :

— C*a* peut être mesuré, par exemple, à une hauteur z_R telle que l'influence du couvert considéré sur la masse d'air devient négligeable.

— H représentera le coefficient d'échange entre la surface et cette hauteur z_R ; une détermination expérimentale de ce coefficient peut, dans certaines conditions, être réalisée par la méthode aérodynamique par exemple (fig. 2) (TANNER, 1963).

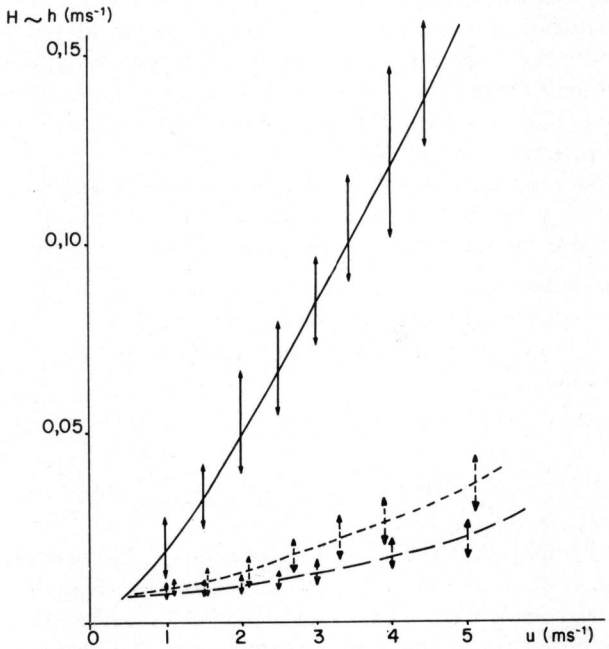


FIG. 2. — *Évolution du coefficient d'échange de masse ou de chaleur en fonction de la vitesse du vent mesurée trois mètres au-dessus de la surface :*

——— pour un champ de maïs (1969, 1971, 1972, La Minière) et représentation de la dispersion des 250 points expérimentaux ;

------- pour un gazon (Alger, 1968 ; 100 points expérimentaux) ;

— — — pour un sol nu (La Minière, 1971, 1972 ; 50 points expérimentaux).

— Cs est généralement difficile à atteindre par la mesure directe mais résulte des échanges d'énergie et de l'équation générale du bilan d'énergie (cf. §. 2 B).

B. — *Équilibre énergétique*

Cet équilibre dont dépendent les tensions de surfaces et finalement, en partie, l'évapotranspiration, doit être bien analysé pour comprendre les différentes actions et interactions entre facteurs qui vont définir la valeur de l'évapotranspiration (PERRIER, 1973).

Bilan d'énergie.

Le bilan d'énergie au niveau d'une telle surface s'écrira (De VRIES, 1963), en considérant comme positif tout ce qui représente un gain pour la surface et inversement, comme négatif tout ce qui est perdu :

$$Rn + \Phi_s + \Phi_L + \Phi_c + A = dQ/dt \qquad (2)$$

Rn représente la résultante des densités de flux de type radiatif ou rayonnement net ;

Φ_s est la densité de flux de chaleur échangée par convection avec l'air ambiant ou flux de chaleur sensible ;

Φ_L est la densité de flux de chaleur latente ou évapotranspiration ;

Φ_c est la densité de flux de chaleur échangée par conduction dans le corps sous-jacent à la surface (sol, eau, neige ou glace dans le cas des surfaces naturelles) ;

A est la quantité d'énergie consommée ou dégagée par les systèmes biologiques s'ils sont présents au niveau de la surface considérée (photosynthèse dans le cas d'un couvert), mais sa valeur est généralement faible surtout pour des intervalles de temps supérieurs à la journée ;

dQ/dt est la variation d'énergie calorifique du système considéré, qui est nulle en régime permanent et pratiquement nulle en régime transitoire, puisque, par hypothèse, notre surface est mince, donc de faible capacité calorifique.

Cette relation classique, en négligeant les termes A et dQ/dt, se détaille de la façon suivante, en faisant ressortir les différentes grandeurs climatiques, les différents paramètres propres à la surface et aux corps (air, couvert, sol) et les tensions d'équilibre (T_s et C_s) (fig. 1) :

$$(1 - a)\ Rg + \varepsilon' Ra - \varepsilon\sigma T_s^4 + \rho\, c_p h(T_a - T_s) + LH\,(C_a - C_s) + \theta\sqrt{\frac{\lambda_s \rho_s c_{ps}}{\tau/2\pi}}\sin\left(\frac{2\pi}{\tau}t + \frac{\pi}{4}\right) = 0 \qquad (3)$$

où θ représente l'amplitude thermique, τ la période, λ_s la conductivité thermique du sol, ρ_s la masse spécifique du sol et c_{ps} la chaleur massique du sol.

Dans cette relation, le flux de chaleur conductif à la surface du sol ne représente qu'un terme énergétique généralement secondaire sauf dans le cas d'un sol nu ou presque nu, et est défini par sa fonction périodique diurne (fig. 3).

Cette expression générale (rel. 3) s'écrira aussi, en ajoutant et retranchant le terme $\varepsilon\sigma T_a^4$, pour faire disparaître la puissance quatrième de la température d'équilibre et la rendre plus simple à résoudre en T_s :

$$(1 - a)\,Rg + \varepsilon\,(Ra^{-} - \sigma' T_a) + (h_o + 4\,\varepsilon\sigma T_a^3)\,(T_a - T_s) + LH\,(C_a - C_s) + \theta\sqrt{\frac{\lambda_s \rho_s C_{ps}}{\tau/2\pi}}\,g\,(t) = 0 \qquad (3\ bis)$$

où ε' est supposé voisin de ε, h_o défini par $\rho\, c_p h$ et $g(t)$ représente la fonction sinusoïdale du temps ou toute autre fonction pouvant donner une meilleure approximation.

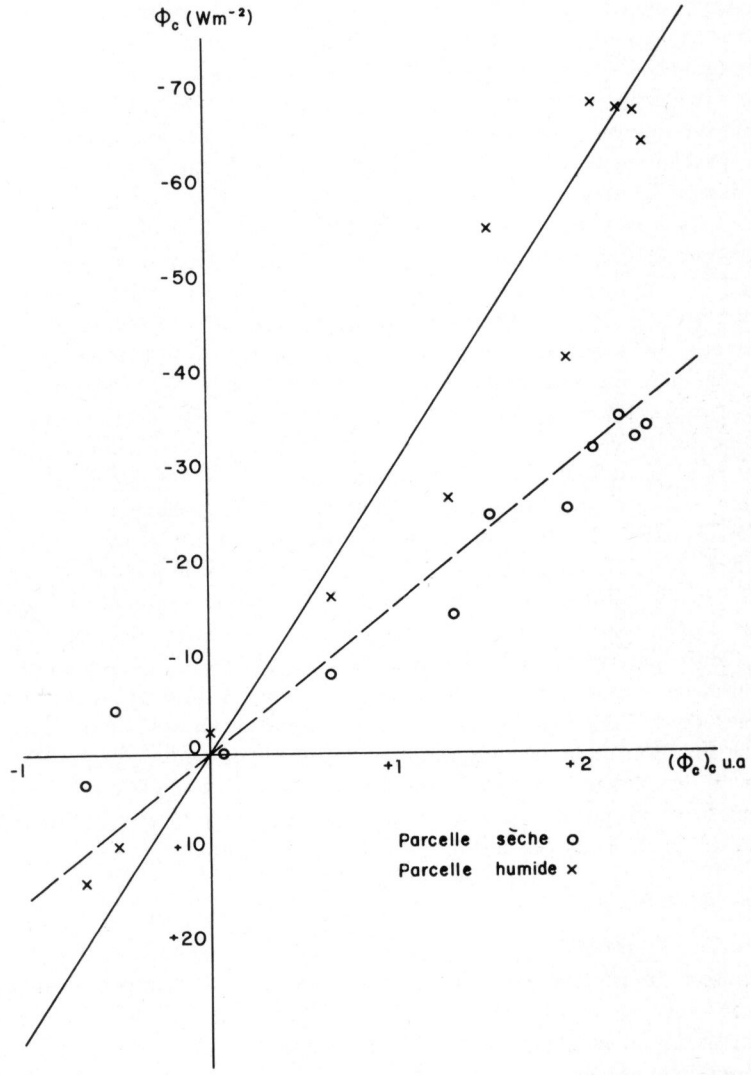


FIG. 3. — *Comparaison entre les valeurs mesurées* Φ_c (en ordonnées) *et les valeurs calculées* (en abscisses) *du flux de chaleur de conduction à la surface d'un sol sec et d'un sol humide* (évolution diurne). Φ_c valeur mesurée par fluxmètre, $(\Phi_c)_c$ valeur calculée à partir de $\theta \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$. La pente des deux droites représente, pour les deux cas de sol, le coefficient $\sqrt{2\pi\,\frac{\lambda_s \rho_s C_{ps}}{\tau}}$.

Facteurs « climatiques » externes.

Sont considérés comme climatiques, les facteurs relatifs au domaine non influencé par la surface considérée ; ce domaine est extérieur à la zone d'air et de sol de part et d'autre de la tranche considérée (ou du couvert), zone qui évolue en fonction du bilan d'énergie de la tranche ; les facteurs considérés sont donc supposés ne pas être influencés par les échanges au niveau de la surface. Cette définition un peu théorique se justifie cependant très bien pour :

R*g*, le rayonnement global (0 à 1000 W m^{-2}) qui est un terme d'apport (positif), généralement largement prépondérant au milieu de la journée. Ce terme est parfaitement indépendant de ce qui se passe au niveau de la surface considérée ;

R*a*, le rayonnement atmosphérique (250 à 450 W m^{-2}) qui dépend très largement de l'eau contenue dans l'atmosphère et en particulier des masses nuageuses, mais reste pratiquement indépendant des variations éventuelles de concentration en vapeur d'eau des quelques mètres au voisinage de la surface ;

T*a*, C*a*, U*a* constituent les trois caractéristiques climatiques qui définissent en réalité la masse d'air (température, concentration en vapeur d'eau, vitesse de la masse d'air). La grande variation verticale de ces facteurs rend difficile le choix des valeurs à prendre en considération pour qu'elles soient indépendantes des conditions au niveau de la surface considérée, mais représentatives de ce qui se passe, au niveau régional. La comparaison des profils verticaux, à l'extérieur de la zone analysée, par rapport à ceux considérés à la verticale de la surface, permet de définir la hauteur de référence z_R, limite des zones d'identité et de divergence des profils. Si ces valeurs ainsi définies sont bien indépendantes de ce qui se passe au niveau de la surface, elles ne sont cependant pas vraiment des valeurs climatiques régionales et s'en écartent d'autant plus que la zone entourant la surface analysée et ayant servi de zone témoin s'éloigne plus des conditions régionales moyennes ;

θ, l'amplitude diurne de température à la surface du sol qui dépend de l'écart entre la température maximale T_{aM} et la température moyenne $\overline{T_a}$ par journée claire. Toute perturbation importante de l'évolution du rayonnement (couverture nuageuse) se traduit par une diminution corrélative momentanée du flux ;

τ, la période de l'évolution diurne qui correspond au double de la durée du jour et évolue en fonction de la latitude et de la saison. Cette période permet le meilleur ajustement du flux calculé au flux diurne mesuré : une dissymétrie entre l'évolution diurne et nocturne ne permettant pas sous notre climat de traiter le problème avec une période de 24 h. Tous ces termes peuvent être mesurés.

Facteurs physiques locaux propres à la surface.

a, l'albédo, caractéristique propre à la surface qui dépend aussi de l'heure du jour (inclinaison du rayonnement incident) et souvent de l'humidité du corps en surface, Θ_s ;

ε, l'émissivité de la surface, pratiquement une constante pour la gamme de longueur d'onde concernée ;

ε', le facteur d'absorption pour le rayonnement atmosphérique de spectre très voisin du spectre d'émission, ce qui conduit à $\varepsilon' \sim \varepsilon$;

Θ_s, l'humidité du corps, en particulier au voisinage de la surface ; la concentration C_s, en équilibre avec la surface, dépend en partie de cette caractéristique

importante, et en partie, des paramètres de régulation (e et r_o, voir chap. II et III) ;

H et h, les coefficients d'échanges qui dépendent, par l'intermédiaire de la turbulence et de la vitesse u_a, des caractéristiques aérodynamiques des surfaces : u_*, la vitesse de frottement, D, la hauteur de déplacement du plan de référence, z_o, la rugosité du couvert (fig. 4) (PERRIER et SEGUIN, 1970). Ce sont donc des paramètres

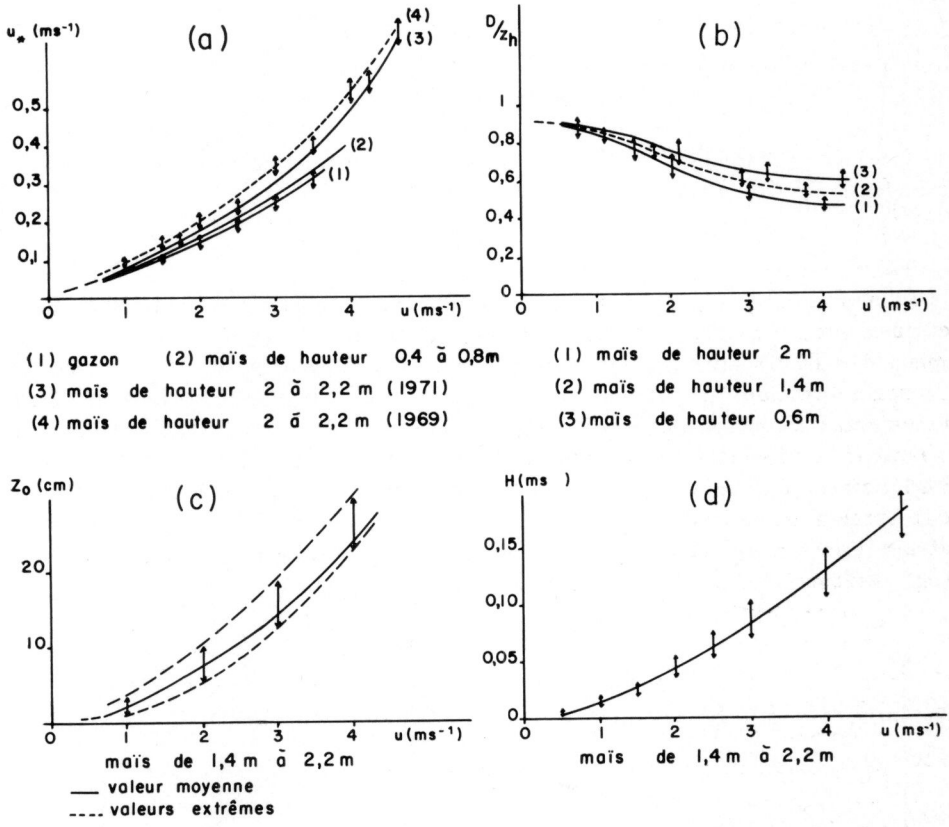


FIG. 4. — *Variation des paramètres aérodynamiques :* u_* vitesse de frottement, D/z_h rapport entre hauteur de déplacement D du plan de référence et hauteur z_h de la culture, z_o paramètre de rugosité, H coefficient d'échange de la culture, en fonction de la vitesse du vent u_* mesurée à 3 mètres au-dessus du sol (La Minière, 1969 et 1971) (100 à 150 points expérimentaux).

qui intègrent à la fois un facteur climatique (u_a) et des propriétés de rugosité propres à la surface. En régime turbulent pour de grandes surfaces, on a (fig. 2) : $h \sim H$.

$$H = ku_* \frac{1}{\text{Log}\dfrac{z_R - D}{z_h - D}} \qquad \left(\text{avec } u(z) = \frac{u_*}{k}\,\text{Log}\frac{z - D}{z_o}\right)$$

z_R, hauteur de référence ; z_h, hauteur de la culture ; k, constante de Karman $\sim$ 0,39.

Facteurs physiques propres aux milieux (air et sol) *extérieurs à la tranche considérée.*

ρ et c_p, la masse volumique et la chaleur massique de l'air. λ_s, ρ_s et c_{ps}, les caractéristiques du sol définies précédemment. Ce ne sont cependant des constantes que pour des intervalles de temps courts (quelques heures à quelques jours), car leur valeur dépend largement de l'humidité du sol qui évolue toujours sur de longues périodes en fonction de l'évaporation.

Les termes d'équilibre.

Ils représentent la résultante de tous ces facteurs ; ce sont d'une part la température de l'interface T_s et, d'autre part, la concentration de vapeur d'eau C_s ; pour un système « mince », cette concentration est en équilibre avec l'humidité de la surface. Ces deux seules inconnues au niveau de la relation générale (3) sont des grandeurs qui dépendent fortement l'une de l'autre :

$$C_s = f(T_s) \tag{4}$$

La formulation de cette relation en fonction des paramètres de régulation (chap. II) et aussi des diffusivités au sein du couvert (chap. III) permet alors, reportée dans la relation 3, de résoudre le bilan d'énergie, c'est-à-dire de déterminer la température T_s seule inconnue du système. La connaissance de cette température, dont le rôle biologique est considérable, revêt un grand intérêt et permet d'autre part, en retour, d'obtenir la concentration d'équilibre C_s (relation 4). Ainsi, la relation 1 se trouve parfaitement définie, et les relations 1, 3 et 4 montrent comment, à partir de tous ces facteurs du climat, du couvert et des milieux (air et sol), l'évapotranspiration et les termes d'équilibre (T_s et T_{rs} ou C_s) prennent une valeur bien déterminée (fig. 5) (DAUDET et PERRIER, 1968).

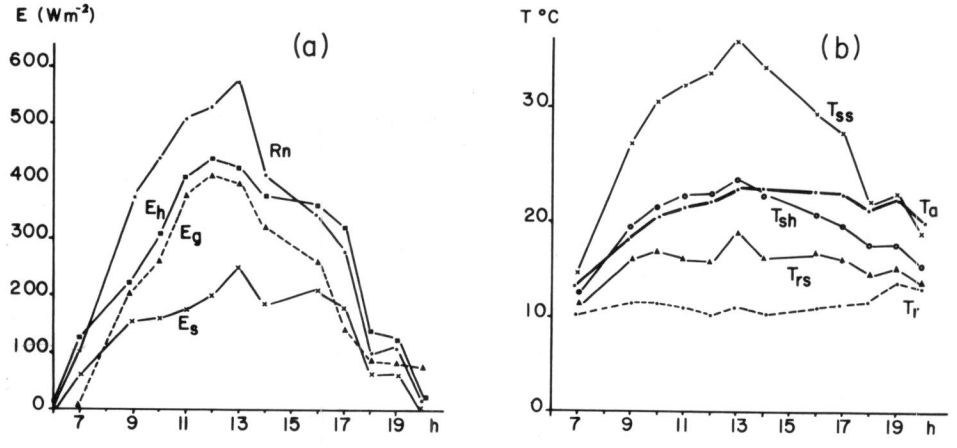


FIG. 5. — a) *Évolution journalière des diverses évapotranspirations d'un sol humide* E_h, *d'un sol sec* E_s, *d'un gazon irrigué* E_g (apport chaque nuit des quantités perdues de jour) *en fonction des heures de la journée pour un rayonnement net* R_n.

b) *Pour la même journée, représentation de l'évolution des caractéristiques de l'air* T_a *et* T_r, *et des températures correspondantes de la surface du sol sec,* T_{ss}, *de la surface du sol humide,* T_{sh}, *et de la température du point de rosée à la surface du sol,* T_{rs}.

Cependant, la difficulté essentielle réside précisément dans l'analyse de cette relation 4 qui dépend entre autres des facteurs de régulation biologique (TANNER et PELTON, 1960) ; il a paru simple de s'affranchir, dans un premier temps, de ces difficultés en choisissant la relation la plus naturelle :

$$C_s = P(T_s) \tag{5}$$

P(T), valeur de la tension de vapeur saturante à la température T.

Si cette relation ne pose pas de problème majeur dans sa définition, en particulier pour un système mince, il est nécessaire dès à présent d'en définir son caractère arbitraire et purement imaginatif dans le cas d'un système à développement vertical (chap. III).

Cette relation simple fournit en outre la valeur maximale que peut atteindre C_s pour une température d'équilibre T_s et conduit par conséquent à la valeur maximale de l'évapotranspiration (cf. relation 1).

3. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Compte tenu de la relation précédente, l'évapotranspiration potentielle d'un couvert est donc l'évapotranspiration maximale de ce couvert si l'ensemble de ses surfaces d'échange est à saturation ($C_s = P(T_s)$). Cette définition physique peut plus ou moins correspondre à la réalité, après une pluie, une forte rosée ou une irrigation par aspersion par exemple.

Dans ces conditions, si Φ_{Lo} représente l'évapotranspiration potentielle du couvert (ETP_o en valeur absolue) et si T_{so} est la température d'équilibre correspondante, on écrira d'après (1) :

$$ETP_o = -\Phi_{Lo} = H_o P'(T_{so} - T_r) \tag{6}$$

où $H_o = \dfrac{LM}{RT} H$

(M, masse molaire de la vapeur d'eau ; R, constante des gaz parfaits ; T, température absolue de l'air ; P', dérivée de la tension de vapeur saturante ; T_r, température du point de rosée de l'air : $C_a = P(T_r)$).

La décomposition de la relation 6 en deux termes $(T_{so} - T_a)$ et $(T_a - T_r)$ permet, en l'introduisant dans la relation générale 3 *bis* où T_s prend la valeur particulière T_{so}, de calculer la seule inconnue $(T_{so} - T_a)$, dont la valeur réintroduite dans la relation 6, conduit à l'évapotranspiration potentielle :

$$ETP_o = \frac{P'(Rn_* + \Phi_c) + (\gamma + \gamma_r) E_a}{\gamma + \gamma_r + P'} \tag{7}$$

$(Rn_* + \Phi_c)$ est un terme climatique aux caractéristiques de la surface (a et ε) et du sol (λ_s, ρ_s, c_{ps}) près, et où Rn_* n'est pas le rayonnement net mais un terme voisin « rayonnement net climatique » indépendant de la température de surface T_s qui dépend en réalité de l'évapotranspiration (fig. 6)

$$Rn_* = (1 - a)\, Rg + \varepsilon(Ra - \sigma T_a^4) \tag{8}$$

E_a, l'évapotranspiration du couvert si sa température d'équilibre était celle de de l'air, T_a ;

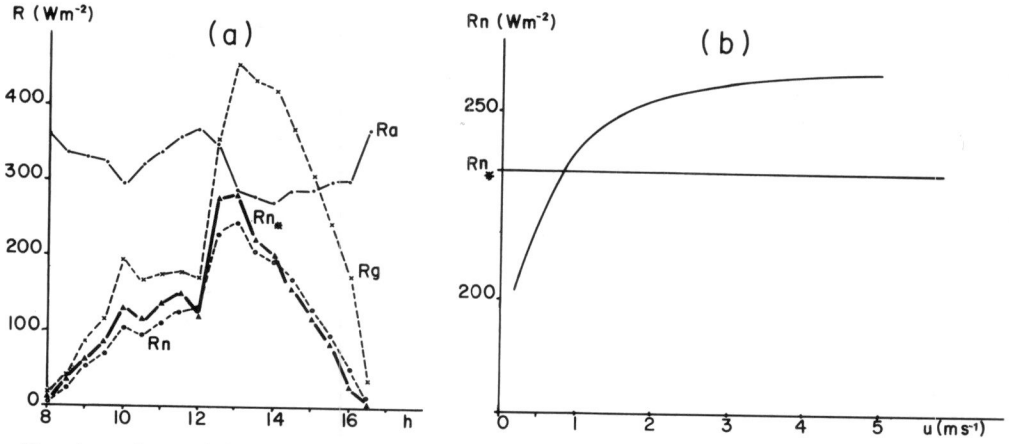


FIG. 6. — *Caractéristiques du rayonnement net* Rn *par rapport au rayonnement net climatique* Rn_*.

a) Évolution journalière comparée des termes d'apport radiatif de type climatique, R*g* et R*a*, et valeur du rayonnement net R*n* et du rayonnement net climatique Rn_* ($T_s > T_a$ entraîne $Rn < Rn_*$ et inversement) (La Minière).

b) Évolution du rayonnement net pour un rayonnement climatique donné Rn_* en fonction de la vitesse du vent et pour une surface de maïs à saturation (ETP).

γ, la constante psychrométrique pour le couvert $\dfrac{h_o}{H_o} = \dfrac{\rho\, c_p h RT}{LHM} \sim \dfrac{\rho\, c_p RT}{LM}$;

γ_r, le rapport entre un coefficient d'échange radiatif et le coefficient d'échange convectif $\dfrac{4\,\varepsilon\sigma T^4 R}{LHM} \sim \dfrac{c}{H_o}$, soit une grandeur qui varie de façon inversement proportionnelle au coefficient d'échange ou à la vitesse du vent (tabl. 1).

La température d'équilibre s'écrit aussi :

$$T_{so} = T_r + \frac{ETP_o}{H_o P'} \tag{9}$$

ou encore :

$$T_{so} = T_a + \frac{1}{H_o}\frac{(Rn_* + \Phi_c) - E_a}{\gamma + \gamma_r + P'} \tag{9 \textit{bis}}$$

Cette température d'équilibre qui correspond à la concentration maximale C_s au niveau de la surface, puisque, dans ce cas, il y a saturation donc pression de vapeur saturante ($C_{so} = P(T_{so})$, relation 5), entraîne, en valeur absolue, la valeur maximale de l'évapotranspiration (relation 6), soit l'évapotranspiration potentielle. Cette température (T_{so}) représente, par voie de conséquence, la valeur maximale ($T_{rs} \leqslant T_{so}$) de la température de rosée à la surface (T_{rs}), et d'autre part, la valeur minimale de la température de surface (T_s) ($T_s \geqslant T_{so}$). En effet, toute réduction de la valeur de T_{rs} par rapport à T_{so} ou de C_{so}, réduit l'évapotranspiration (relation 1) en valeur absolue et augmente le flux de chaleur sensible, soit la température de surface T_s (rel. 3).

TABLEAU I

Évolution de la variable γ_r en fonction de la vitesse du vent et de trois températures pour trois types de surface

γ_r		u m s^{-1} 1	2	3	4	5
Sol nu	$T_a \sim 10°$	66,0	35,2	26,5	17,5	13,2
	$\sim 20°$	75,7	40,5	30,3	20,2	15,2
	$\sim 30°$	86,3	46,0	34,5	23,0	17,3
Gazon	$\sim 10°$	37,7	20,3	13,9	9,8	7,3
	$\sim 20°$	43,3	23,3	16,0	11,2	8,4
	$\sim 30°$	49,3	26,5	18,2	12,8	9,6
Maïs	$\sim 10°$	15,5	5,6	3,2	2,2	1,6
	$\sim 20°$	17,8	6,5	3,7	2,5	1,9
	$\sim 30°$	10,3	7,3	4,1	2,9	2,1

Toute réduction de l'évapotranspiration par rapport à ETP_o conduit à une dissociation de la valeur de T_{rs} et de celle de T_s qui sont confondues en T_{so} (cas d'ETP_o) et évoluent de part et d'autre de T_{so} (fig. 5), (cf. chapitre suivant).

$$T_{rs} \leqslant T_{so} \leqslant T_s \qquad (10)$$

CONCLUSIONS

Cette analyse a montré qu'une définition physique pratique de l'évapotranspiration d'un couvert était possible (surface d'échange saturée en tout point) et conduisait à la notion d'ETP_o introduite par PENMAN. Indépendamment de la correction introduite par rapport à la formule de PENMAN — terme γ_r qui traduit les effets de température de surface sur le rayonnement net réel Rn par rapport au rayonnement net climatique Rn_* — il faut souligner que :

— cette évapotranspiration potentielle est propre à chaque couvert (rôle de H_o dans γ_r et E_a), (RIJTENNA, 1965) ;
— elle peut être très différente de celle d'une nappe d'eau libre (BUSINGER, 1956, 1959) ;
— elle est, par définition, très différente de la valeur donnée par la formule de PENMAN qui fut testée pour un couvert bien irrigué mais dont les surfaces ne sont pas du tout à saturation (PENMAN et SCHOFIELD, 1951).

L'intérêt de cette définition de l'évapotranspiration potentielle ETP_o réside d'une part en tant que valeur indépendante des résistances biologiques ou physiques de la diffusion de l'eau jusqu'aux surfaces d'échanges (alimentation hydrique), et d'autre part en tant que valeur maximale. Cette valeur limite de l'évaporation qui conduit aussi, sous l'angle thermique, à une valeur charnière de la température de surface (T_{so}) (relation 10), a l'avantage de n'être définie qu'à partir de paramètres purement physiques relatifs au climat et à la structure propre de la surface considérée :

Facteurs climatiques

En valeur absolue :

— Augmentation de l'évaporation en fonction de Rg.
— Augmentation en fonction de Ra.
— Augmentation en fonction du déficit de saturation de l'air traduit par l'écart $(T_a - T_r)$.
— Augmentation en fonction du coefficient d'échange H, soit corrélativement en fonction de la vitesse du vent.

Facteurs propres à la surface et au corps

De même, en valeur absolue :

— Diminution en fonction de l'accroissement de a et généralement en fonction de ε (le terme $Ra - \sigma T_a^4$ étant le plus souvent négatif).
— Augmentation lorsque la rugosité de surface augmente les échanges.
— Diminution lorsque Φ_c augmente en valeur absolue.

L'évapotranspiration réelle des surfaces planes ou des surfaces à développement vertical (cas des couverts) sera déduite de l'analyse précédente en introduisant en plus des paramètres permettant de traduire l'alimentation hydrique de ces surfaces, leur potentiel et les phénomènes de diffusion vapeur, ce qui fait l'objet des deux chapitres suivants.

Reçu pour publication en octobre 1974.

SUMMARY

PHYSICAL STUDY OF EVAPOTRANSPIRATION IN NATURAL CONDITIONS. I. — ENERGY BALANCE OF NATURAL SURFACES AND EVAPORATION

According to the classical relations describing transfer and energy balance, actual evaporation and potential evaporation are analysed in function of four kinds of parameters ; some basic assumptions and links are remembered in order to specify the classical relations used in the following chapter.

ZUSAMMENFASSUNG

PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN AN DER EVAPOTRANSPIRATION UNTER NATÜRLICHEN BEDINGUNGEN. I. — VERDUNSTUNG UND ENERGIEHAUSHALT VON NATÜRLICHEN OBERFLÄCHEN

Ausgehend von den Grundbeziehungen, die den Austausch der Energie und den Energiehaushalt umschreiben, wird die reelle und die potentielle Evapotranspiration dargestellt. Dabei wird besonders die Wirkung der verschiedenen unabhängigen Parametern unterstrichen, die hier in vier Gruppen eingeteilt sind. Die Grundhypothesen und gewisse Beziehungen zwischen den Parametern werden in Erinnerung gerufen, damit eine ausführliche Analyse der Evapotranspiration in den folgenden zwei Kapiteln möglich wird.

РЕЗЮМЕ

Физическое изучение эвапотранспирации в природных условиях.

А. ПЕРРЬЕ

Реальная и потенциальная эвапотранспирации рассматриваются на базе основных формул обмена и чтобы подчеркнуть действие разных независимых параметров, сгруппированных в данной работе под четырьмя рубриками. Затем, для более детального их анализа, две следующих главы посвящены обсуждению основных гипотез и некоторых связей существующих между указанными параметрами.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUSINGER J. A., 1956. Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration. *Neth. J. Agric. Sci.*, **4**, 77-80.

BUSINGER J. A., 1959. A generalization of the mixing length concept. *J. Meteor.*, **16**, 516-523.

DAUDET F., PERRIER A., 1968. Étude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. Gén. Thermique*, Vol. 7, **76**, 353-364.

MONTEITH J. L., 1965. Evaporation and environment. In : *The state and movement of water in living organisms, Symposia Soc. for Exper. Biol.*, XIX, 205-234, University Press, Cambridge, U. K.

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, Londres, (A) **193**, 120-145.

PENMAN H. L., SCHOFIELD R. K., 1951. Some physical aspects of assimilation and transpiration. *Symposia Soc. for Exper. Biol.*, **5**, 115-129.

PERRIER A., SEGUIN B, 1970. Méthodes et techniques de détermination des cœfficients de transfert et des flux dans l'air. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, 425-445, I. N. R. A. édit., Paris.

PERRIER A., 1973. Bilan énergétique d'une culture. In *Agroclimatology in the semi-arid areas South of the Sahara*, nº 340, 90-107, W. M. O. édit. Conf. Dakar (Sénégal) fév. 1971.

RIJTEMA P. E., 1965. *An analysis of actual evapotranspiration.* Agricultural Research Report, nº 659, 107 p., Centre for Agricultural Publication and Documentation, Wageningen (The Netherlands).

TANNER C. B., 1963. Energy relations in plant communities. In : *Environmental Control of Plant growth*, 141-148, EVANS édit., Academic Press, New York.

TANNER C. B., PELTON W. L., 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3391-3413.

De VRIES D. A., 1963. The physics of Plant environments. In : *Environmental control of Plant growth* 5-22, EVANS édit., Academic Press, New York.

Ann. agron., 1975, **26** (1), 19-40.

MESURE AUTOMATIQUE DU BILAN D'ÉNERGIE D'UNE CULTURE. EXEMPLES D'APPLICATION

A. PERRIER, B. ITIER, J. M. BERTOLINI et A. BLANCO de PABLOS*

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

* *Centro de Edafologia y de Agrobiologia aplicado,*
Salamanca (Espagne)

RÉSUMÉ

La méthode du bilan d'énergie est utilisée classiquement pour déterminer les flux de chaleur sensible Φ_s et de chaleur latente Φ_L à partir de la mesure du rayonnement net R*n*, du flux de chaleur dans le sol et des gradients de température et de concentration de vapeur d'eau.

L'ensemble automatique décrit ici comprend, non seulement les capteurs (bilanmètre, fluxmètre, psychromètres, thermomètres) et l'acquisition de données, mais également les organes de gestion et de calcul, et délivre, heure par heure, sur imprimante, les quatre termes du bilan d'énergie (fig. 5).

Les résultats obtenus avec des types de temps très différents (fig. 6) demeurent satisfaisants et l'on a pu vérifier leur validité en comparant les valeurs de Φ_L (flux de chaleur latente ou évapotranspiration déterminées respectivement par cette méthode et les évapotranspiromètres pesables (fig. 7).

L'application de ces mesures à la détermination continue du bilan hydrique est immédiate. On montre par ailleurs comment le rapport Φ_s/Φ_L (fig. 8 et 9) permet d'exprimer en terme de résistance la réaction du couvert végétal aux conditions instantanées d'alimentation hydrique.

INTRODUCTION

La méthode du bilan d'énergie dont BOWEN (1926) fut un des premiers à expliciter la théorie et à utiliser les possibilités, a toujours été assez largement employée. Cette méthode, suffisamment simple et pratique, est particulièrement utile pour l'étude, dans les conditions naturelles, de la transformation de l'énergie radiative, en particulier de son utilisation pour la vaporisation de l'eau ; pour ces raisons, la méthode du bilan d'énergie est très fructueuse en écologie. Cependant, la mesure de

certains termes nécessaires à cette méthode est toujours restée difficile à obtenir ; en outre, les résultats sont le plus souvent acquis avec une précision insuffisante (FRITSCHEN, 1965). C'était en particulier le cas de la mesure du flux radiatif qui est actuellement mieux résolu, mais c'est encore le cas de la mesure du gradient de concentration en vapeur d'eau. Cette dernière mesure rend la méthode toujours délicate, parfois imprécise, et surtout pas toujours fiable. Cette difficulté instrumentale, jointe par ailleurs à une certaine longueur dans le dépouillement des mesures et le calcul des termes de flux (chaleur latente Φ_L et chaleur sensible Φ_s) a pour conséquence de réduire considérablement son emploi, en particulier sur de grands intervalles de temps, comme par exemple une période de végétation.

Cependant, la détermination simultanée de tous les flux énergétiques d'une surface cultivée dans les conditions naturelles en fait un outil d'une grande utilité pour la connaissance de la consommation en eau d'une culture en fonction des facteurs climatiques et de son état biologique et énergétique. Dans ce sens, le développement d'un système de mesure permettant une meilleure fiabilité dans les résultats et une grande simplification dans l'obtention de ces résultats était d'un intérêt certain dans les études de l'évapotranspiration réelle des couverts. La réalisation d'un système qui réponde à ces objectifs ouvre la voie à une multiplication des mesures simultanées de l'évapotranspiration réelle de divers couverts, mesures qui, par intégration et moyenne, permettent en définitive d'estimer l'évapotranspiration régionale.

I. — MÉTHODE DU BILAN D'ÉNERGIE

La relation classique utilisée ici est celle qui somme l'ensemble des échanges d'énergie au niveau d'une culture prise dans son ensemble, avec les hypothèses d'homogénéité, d'absence d'inertie du couvert végétal et de conservation des flux que cela représente (TANNER, 1960) :

$$Rn + \Phi_0 + \Phi_L + \Phi_s = 0 \qquad (1)$$

Chaque densité de flux est considérée ici comme positive si elle représente un gain pour le système (couvert végétal), et négative dans le cas contraire.

Rn représente le rayonnement net ($W\ m^{-2}$),

Φ_0, la densité de flux de chaleur par conduction à la surface du sol ($W\ m^{-2}$),

Φ_L, la densité de flux de chaleur latente, ou évapotranspiration réelle en énergie ($W\ m^{-2}$),

Φ_s, la densité de flux de chaleur sensible dans l'air ($W\ m^{-2}$).

L'énergie accumulée ou consommée par le couvert est ici négligée compte tenu de la précision de 5 à 10 p. 100 sur la mesure des différents termes.

L'expression des densités de flux de chaleur sensible ou latente peut être reliée aux gradients respectivement de température de l'air Ta et de concentration de vapeur d'eau C :

$$\Phi_s = \rho c_p\, K(z)\, \frac{\partial Ta(z)}{\partial z} \simeq \rho c_p\, K(z)\, \frac{\Delta Ta}{\Delta z} \qquad (2)$$

$$\Phi_L = L_v K(z) \frac{\partial C(z)}{\partial z} \simeq L_v K(z) \frac{\Delta C}{\Delta z} \text{ (1)} \qquad (3)$$

ρ : masse spécifique de l'air,
c_p : capacité calorifique de l'air à pression constante,
L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau,
$K(z)$: diffusivité turbulente au niveau moyen z des mesures (on considérera que cette diffusivité turbulente est identique dans les cas de transfert de chaleur et de vapeur d'eau),
ΔTa et ΔC : écarts de température et de concentration de vapeur d'eau dans l'air entre les deux niveaux de mesure choisis au voisinage de la surface.

Dès lors, la mesure simultanée des quatre termes :
Rn par le bilanmètre,
Φ_0 par le fluxmètre,
$\Delta Ta/\Delta z$ et $\Delta C/\Delta z$ par les psychromètres placés aux deux niveaux de $z - \frac{\Delta z}{2}$ et $z + \frac{\Delta z}{2}$ permet de déduire les valeurs des deux flux Φ_s et Φ_L ; en effet l'équation (1) donne leur somme :

$$\Phi_s + \Phi_L = -(Rn + \Phi_0) \qquad (4)$$

tandis que les équations (2) et (3) donnent leur rapport :

$$\Phi_s/\Phi_L = \rho c_p \Delta Ta/L_v \Delta C \qquad (5)$$

En ce qui concerne le mode de calcul, on peut montrer (WEBB, 1965 ; PERRIER et SEGUIN, 1970), compte tenu des équations psychrométriques, qu'il est inutile d'expliciter les valeurs de la concentration C et que l'on peut s'en tenir à la considération des températures sèches Ta et humides Th aux deux niveaux de mesure. Le calcul conduit à :

$$\Phi_s = \alpha(Rn + \Phi_0) \frac{\Delta Ta}{\Delta Th} \qquad (6)$$

où

$$\alpha = \rho c_p \Big/ \left(\rho c_p + \frac{LMP'}{RT}\right) = \gamma/(P' + \gamma)$$

avec

$$\gamma = \rho \frac{c_p RT}{LM} \text{ : constante psychrométrique.}$$

P' la dérivée de la tension de vapeur saturante pour Th (avec R la constante des gaz parfaits, M la masse molaire de l'eau et T la température absolue de l'air).

$$\Phi_L = -(Rn + \Phi_0)\left(1 - \alpha \frac{\Delta Ta}{\Delta Th}\right) \qquad (7)$$

(1) Il existe trois façons différentes d'écrire un flux :

1. $\Phi = K(z) \frac{\partial C(z)}{\partial z}$
2. $\Phi = H(Ca - Cs)$
3. $\Phi = \frac{Ca - Cs}{ra}$

avec Ca : concentration de la quantité échangée à un niveau de référence donné dans l'air z_r,
Cs : concentration au niveau de la surface choisie z_n,
H : coefficient d'échange entre les niveaux z_n et z_r.
ra : résistance de passage dans l'air pour les mêmes niveaux.

Les calculs intermédiaires permettent également d'expliciter la valeur de la diffusivité turbulente $K(z)$.

$$K(z) = \frac{1}{\rho c_p + \frac{LMP'}{RT}} \cdot \frac{Rn + \Phi_0}{\Delta Th/\Delta z} \tag{8}$$

2. — APPAREILLAGE POUR LE BILAN D'ÉNERGIE

L'utilisation de la méthode du bilan d'énergie nécessite donc l'utilisation de quatre types de capteurs et d'un système de mesure des grandeurs délivrées par ces capteurs :

A. — *Capteurs utilisés*

Les capteurs nécessaires sont des appareillages classiques en micro-météorologie, quoique la mesure des gradients de température de l'air et des concentrations de vapeur d'eau ne soit pas standardisée.

Pour le rayonnement net, nous utilisons différents types de bilanmètres dont, en particulier, les Swissteco (type S_1) qui délivrent une force électromotrice de 45 μv/w m^{-2} (fig. 1 *a*).

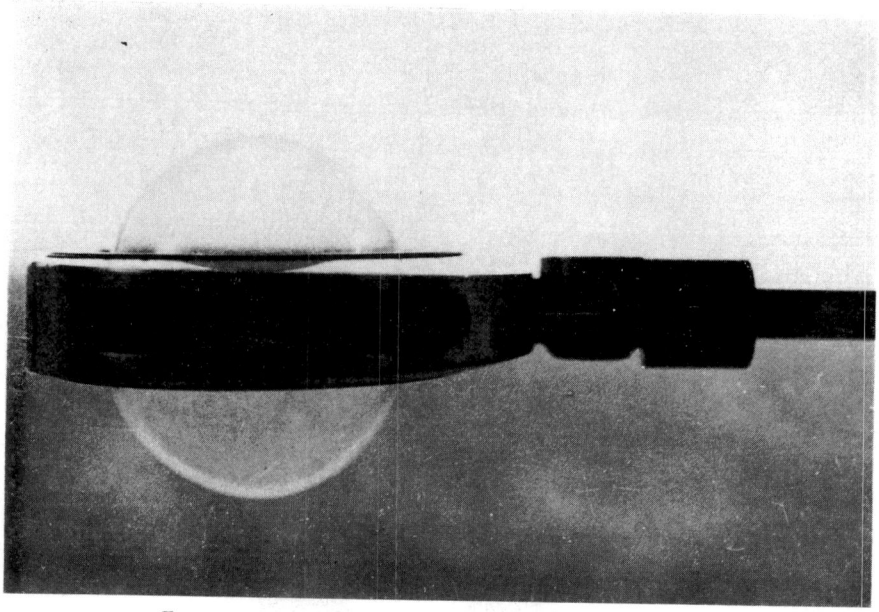


FIG. 1 *a*. — *Tête de mesure du bilanmètre Swissteco type* S_1

Pour le flux de conduction à la surface du sol, de petits fluxmètres délivrant une f.e.m. de 8,7 μv/w m^{-2} (type Thornthwaite Associates n° 610) sont placés à 3 cm de profondeur et maintenus parallèlement à la surface grâce à un support (fig. 1 *b*). Bien que la valeur obtenue soit entachée d'erreur dans la mesure où :

— le flux à 3 cm est différent (généralement plus faible) de celui de la surface,

— la plaquette du fluxmètre a des caractéristiques thermiques et hydriques différentes de celles du sol,

le flux sous couvert végétal est suffisamment faible pour qu'une erreur de 10 p. 100 soit facilement tolérée (PERRIER et SEGUIN, 1970).

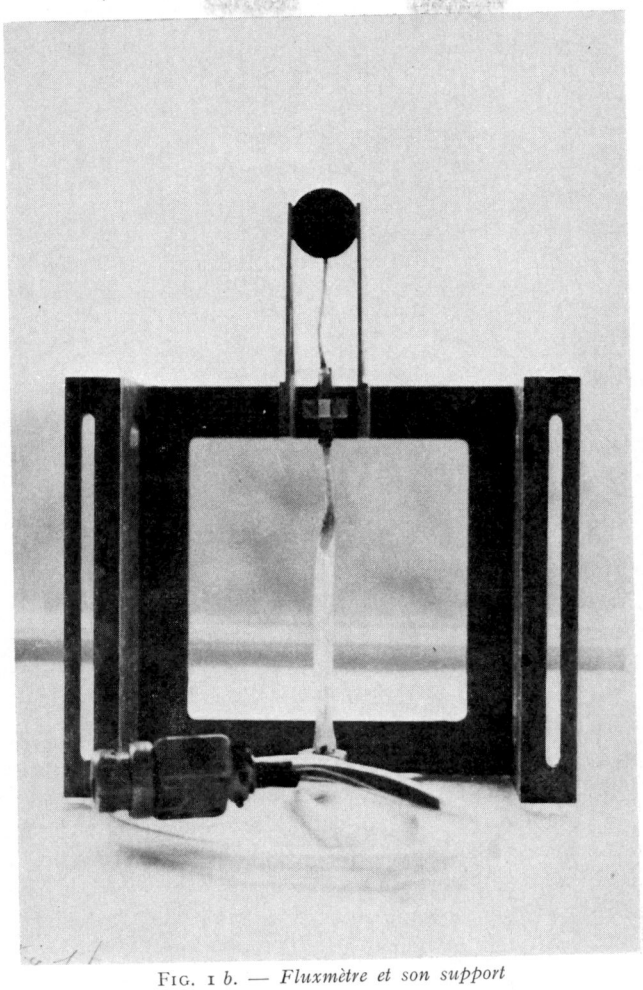


FIG. 1 *b*. — *Fluxmètre et son support*

Pour mesurer les gradients de température sèche et humide, un montage psychrométrique différentiel double est utilisé (SECK et PERRIER, 1970).

Ce système de mesure thermoélectrique comprend des thermocouples cuivre-constantan (40 μv/°C, donc 80 μv/°C pour le montage double) qui permettent la mesure des écarts ΔTa et ΔTh entre les deux niveaux retenus $z - \frac{\Delta z}{2}$ et $z + \frac{\Delta z}{2}$, ainsi que la mesure des écarts entre la température de l'air Ta ou la température humide Th, et une température de référence T_0 mesurée par thermorésistance à 50 cm de profondeur. Il faut en effet noter que les températures sèches et/ou humides sont nécessaires au calcul de ρ, c_p, L, et P′.

B. — *Système de mesure*

Un enregistreur potentiométrique à plusieurs directions et différentes sensibilités a été utilisé depuis plusieurs années pour l'enregistrement des sept valeurs du bilan d'énergie : Rn, Φ_0, ΔTa, ΔTh, Ta, Th, T_0. Une valeur moyenne sur 10 mn environ de ces sept grandeurs était obtenue à partir des dépouillements manuels des graphiques d'enregistrement chaque demi-heure ou chaque heure.

La difficulté d'une telle expérience réside d'une part dans la surveillance étroite des capteurs et, en particulier des psychromètres, et d'autre part, dans le soin à apporter au calcul des valeurs moyennes, calcul long et fastidieux en particulier quand l'ensoleillement est variable.

Le système qui fait l'objet de cette présentation est une petite centrale de mesure (1) associée à un calculateur, dont le but est de fournir des valeurs horaires du bilan d'énergie en temps réel et d'assurer une meilleure fiabilité des mesures psychrométriques.

Description :

Une acquisition de données de 7 voies commandée par une unité de gestion et de calcul (fig. 2) réalisée et programmée spécialement pour ce problème (et éventuellement reprogrammable) exécute les séquences de mesures, les tests et les calculs.

Les psychromètres (deux par niveaux) sont montés sur un système mécanique (fig. 3) qui permet (sur ordre de la centrale) d'inverser leurs positions, ceux du haut passant en position basse et réciproquement (fig. 4). La mesure des écarts peut être ainsi réalisée en faisant la moyenne des valeurs obtenues dans les deux positions avec inversion des signes pour la seconde (Seck et Perrier, 1970), ce qui permet d'éliminer certaines erreurs systématiques dans l'évaluation de ΔTa et ΔTh. Compte tenu du temps d'inversion (1 mn) et du temps de stabilisation des valeurs psychrométriques (30 s), un intervalle de temps de 2 mn entre chaque mesure a été retenu.

Ainsi, toutes les deux minutes, une mesure fine des différents paramètres entrant dans le calcul du bilan d'énergie (1 μV de résolution) est réalisée dans l'une des positions 1 ou 2 des psychromètres (fig. 4). La moyenne des deux valeurs successives pour chacune des grandeurs permet un calcul du bilan d'énergie dont les différents termes sont mis en mémoire. Toutes les heures, une impression de l'heure et de la valeur moyenne des quatre termes du bilan d'énergie représentatifs de l'heure écoulée est réalisée. Ces valeurs moyennes des trente bilans d'énergie effectués durant chaque heure sont gardées en mémoire afin d'obtenir toutes les 24 heures une impression des valeurs moyennes journalières (cf. diagramme, fig. 5). Un organigramme plus détaillé est fourni par ailleurs (Perrier et Bertolini, 1974).

Le calcul du bilan d'énergie suit strictement les relations données ((6) et (7) en particulier). La valeur α (déterminée à partir de la température humide Th par une relation du second degré introduite dans le programme : $\alpha = -0{,}601\,24 + 0{,}017\,04\,Th - 0{,}000\,14\,Th^2$, où Th est en °Celsius), est obtenue avec une précision meilleure que 1 p. 100, pour une gamme de température humide comprise entre 0 et 30°C.

Ce système, conçu pour être facilement transportable, est adaptable sur n'importe quel champ expérimental où l'on dispose du secteur électrique (220 V, 50 Hz).

(1) Cette centrale est appelée B.E.A.R.N. (Bilan d'Énergie Automatique Régional et Numérique) ; elle a été réalisée par la Société R 2 E.

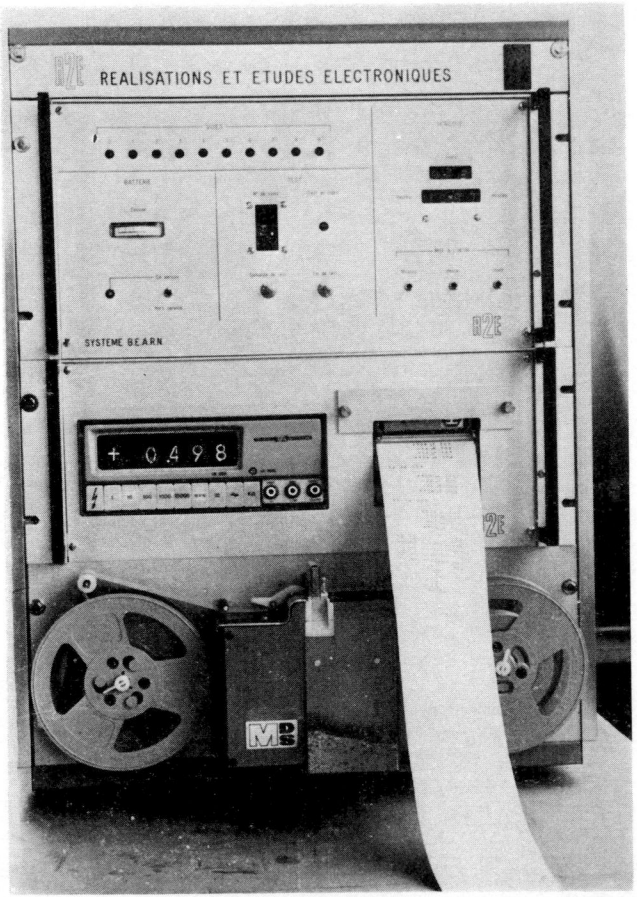


FIG. 2. — *Acquisition de données et unité de gestion et de calcul*

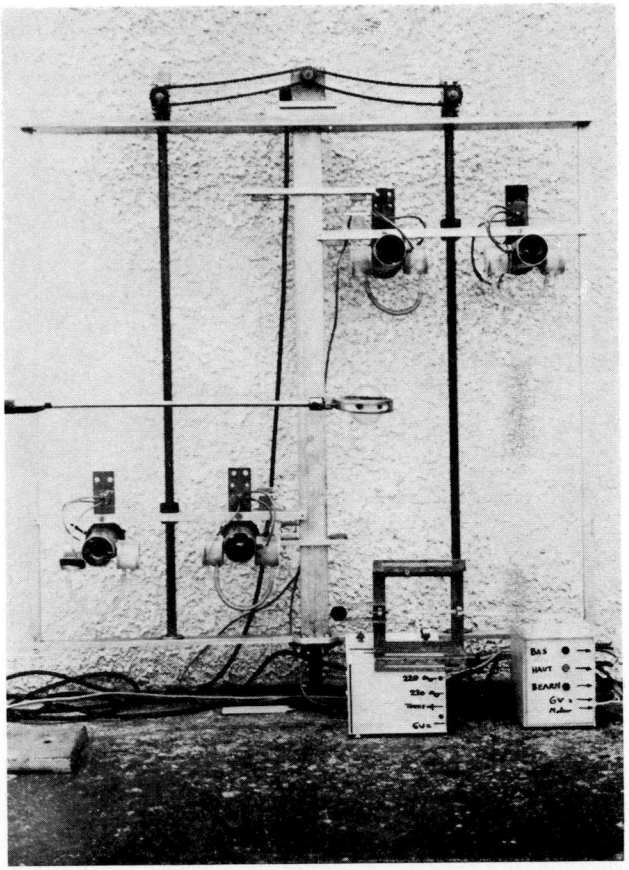


FIG. 3. — *Ensemble des capteurs :*

Au premier plan, de gauche à droite : bilanmètre, fluxmètre, boitier de commande du système inverseur ;
A l'arrière plan : psychromètres montés sur leur chassis inverseur.

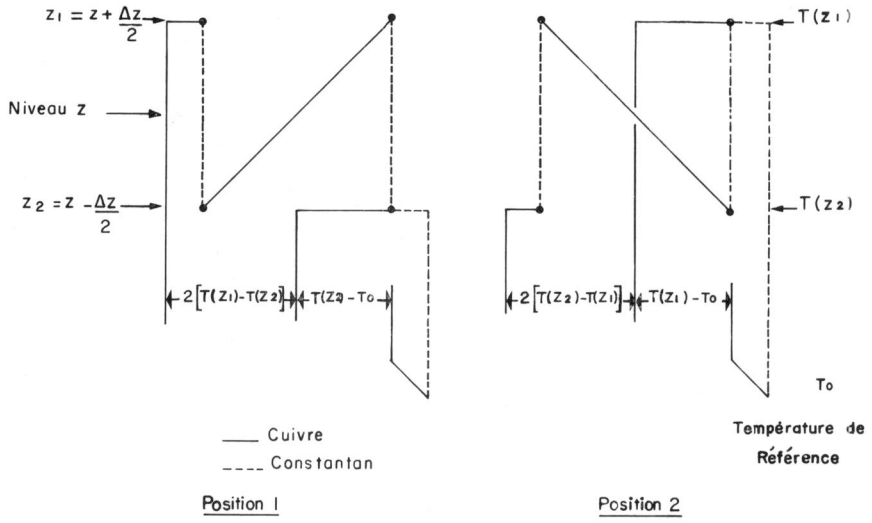


FIG. 4. — *Valeurs mesurées et valeurs retenues pour les températures et leurs écarts dans les positions 1 et 2 des psychromètres*

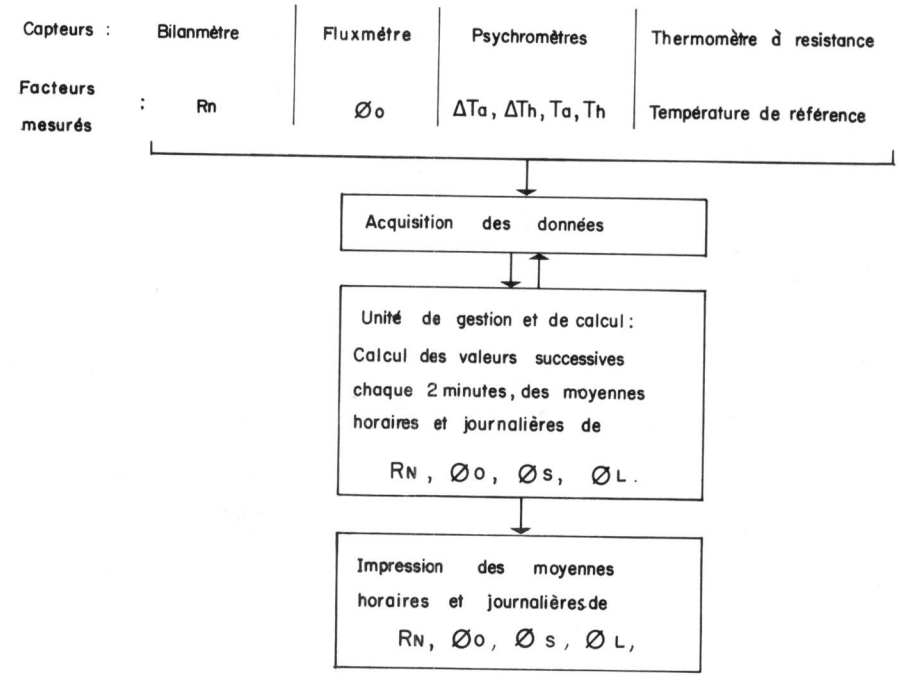


FIG. 5. — *Schéma général de fonctionnement*

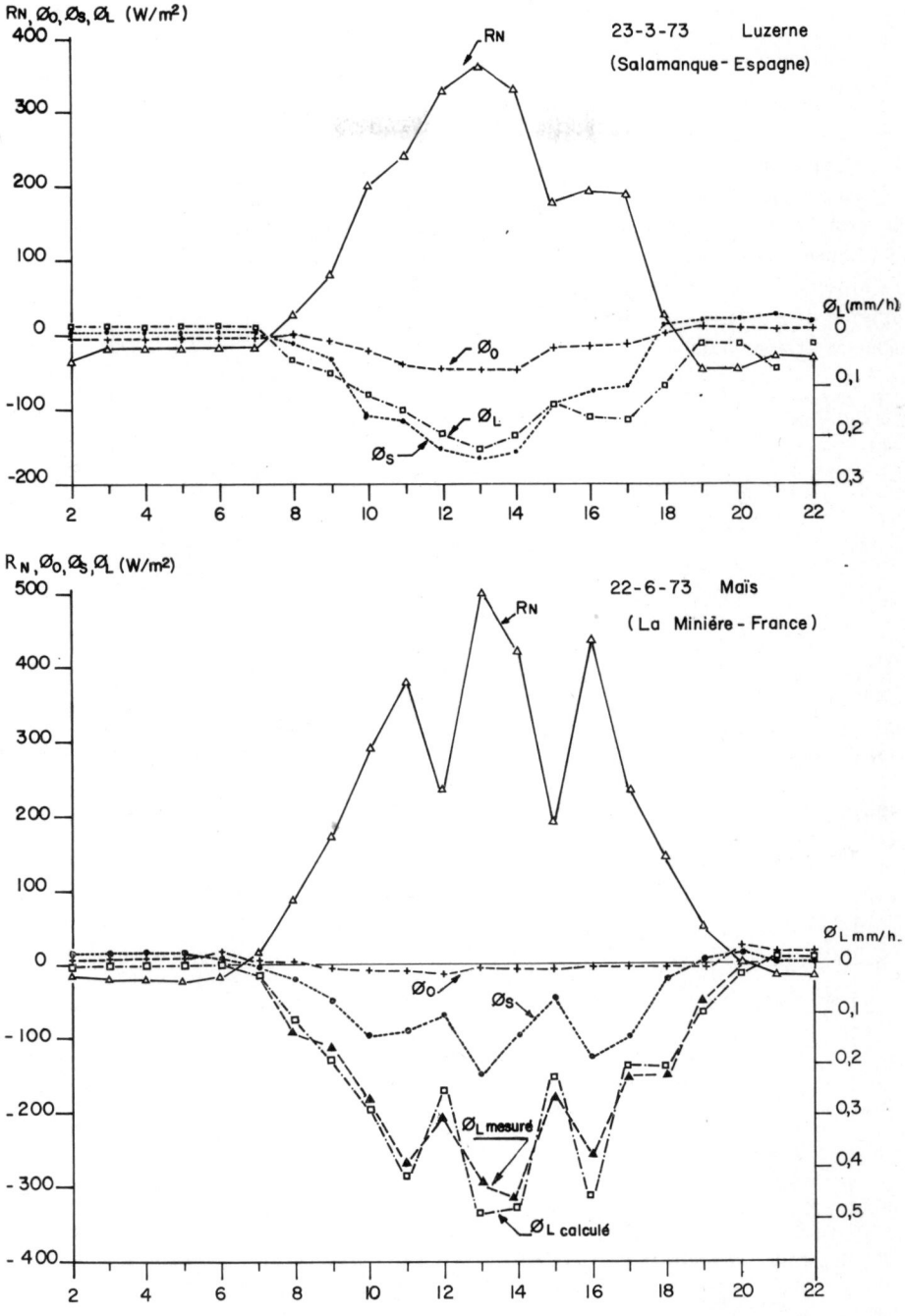


FIG. 6. — *Deux exemples de variation des quatre termes du bilan d'énergie*

6 *a* : Salamanque, le 23-3-1973

6 *b* : La Minière, Versailles, le 22-6-1973
(Φ_L mesuré obtenu sur cuve pesable)

3. — PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS

La figure 6 donne, à titre d'exemple, la variation des quatre termes du bilan d'énergie au cours de deux journées différentes, respectivement à Versailles sur un champ de maïs et à Salamanque sur un champ de luzerne.

En ce qui concerne les résultats obtenus à Versailles, La Minière, nous avons pu profiter du fait que le flux de chaleur latente Φ_L (ou l'ETR) était mesuré à l'échelle de l'heure sur un évapotranspiromètre pesable très sensible, pour comparer systématiquement les évapotranspirations ainsi obtenues aux valeurs fournies par le système décrit ci-dessus (fig. 7 *a*). Le coefficient de corrélation trouvé entre les deux mesures atteint 0,92.

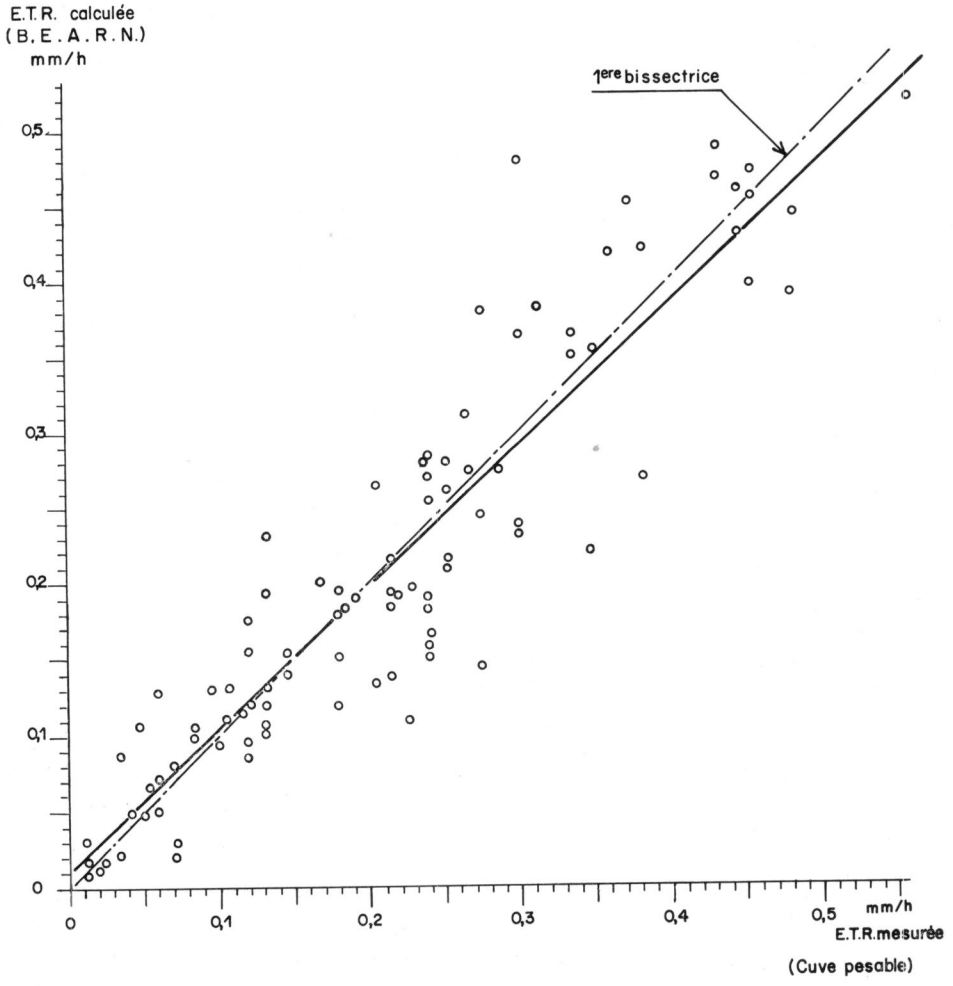


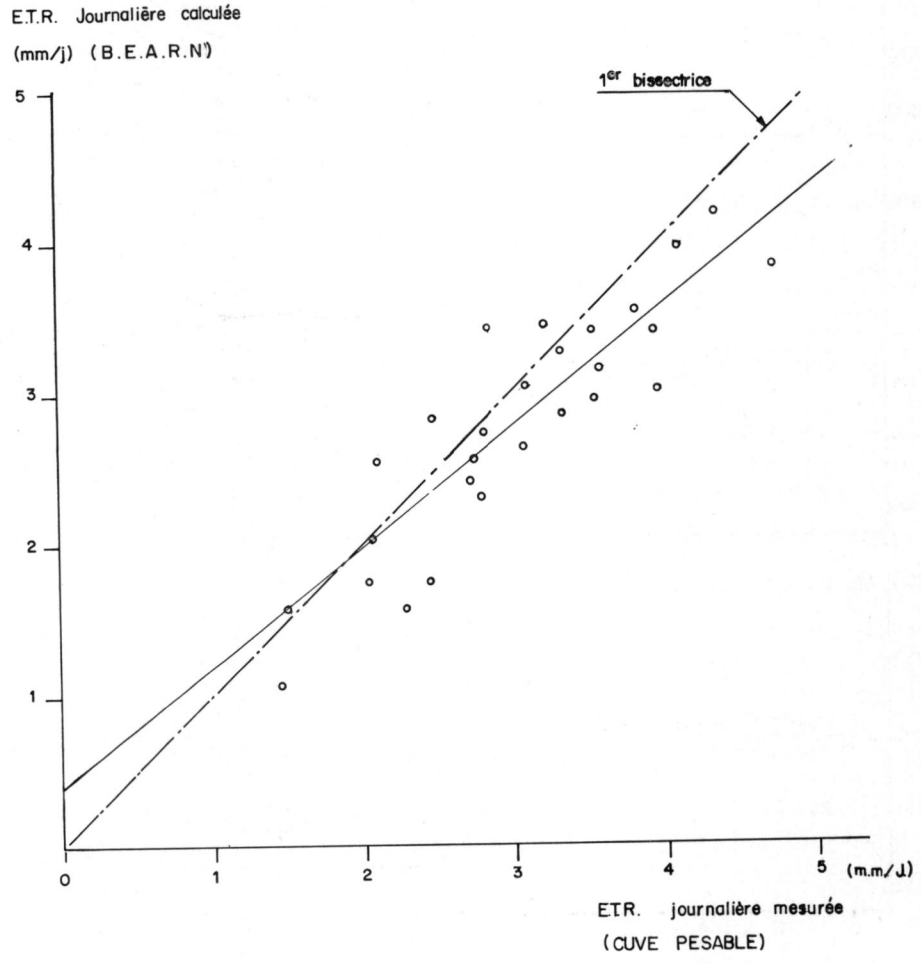
FIG. 7. — *Comparaison des valeurs de l'évapotranspiration fournies par le système B.E.A.R.N. et un lysimètre pesable à La Minière, Versailles* (été 1973)

7 *a* : valeurs horaires

La droite de régression correspondante, qui répond à la formule :

$$Ec = 0{,}96\ Em + 0{,}01$$

(où Ec désigne l'évapotranspiration calculée en mm par la méthode décrite ici et Em l'évapotranspiration mesurée en mm sur évapotranspiromètre pesable), est très voisine de la première bissectrice. Il convient de noter que la dispersion des points autour de la droite de régression peut résulter tout autant d'une erreur sur les valeurs mesurées à l'évapotranspiromètre que sur les valeurs calculées par la méthode du bilan d'énergie (la précision de mesure étant de 0,05 mm sur le premier).



7 b : valeurs journalières

En outre, si au lieu de considérer des valeurs horaires, on effectue la même comparaison sur les évapotranspirations journalières, la dispersion est beaucoup moins importante, dans la mesure où l'on élimine les journées au cours desquelles est survenue une défaillance technique. Par contre, si l'on établit la corrélation en considérant la totalité des journées, le coefficient de corrélation (qui rend compte

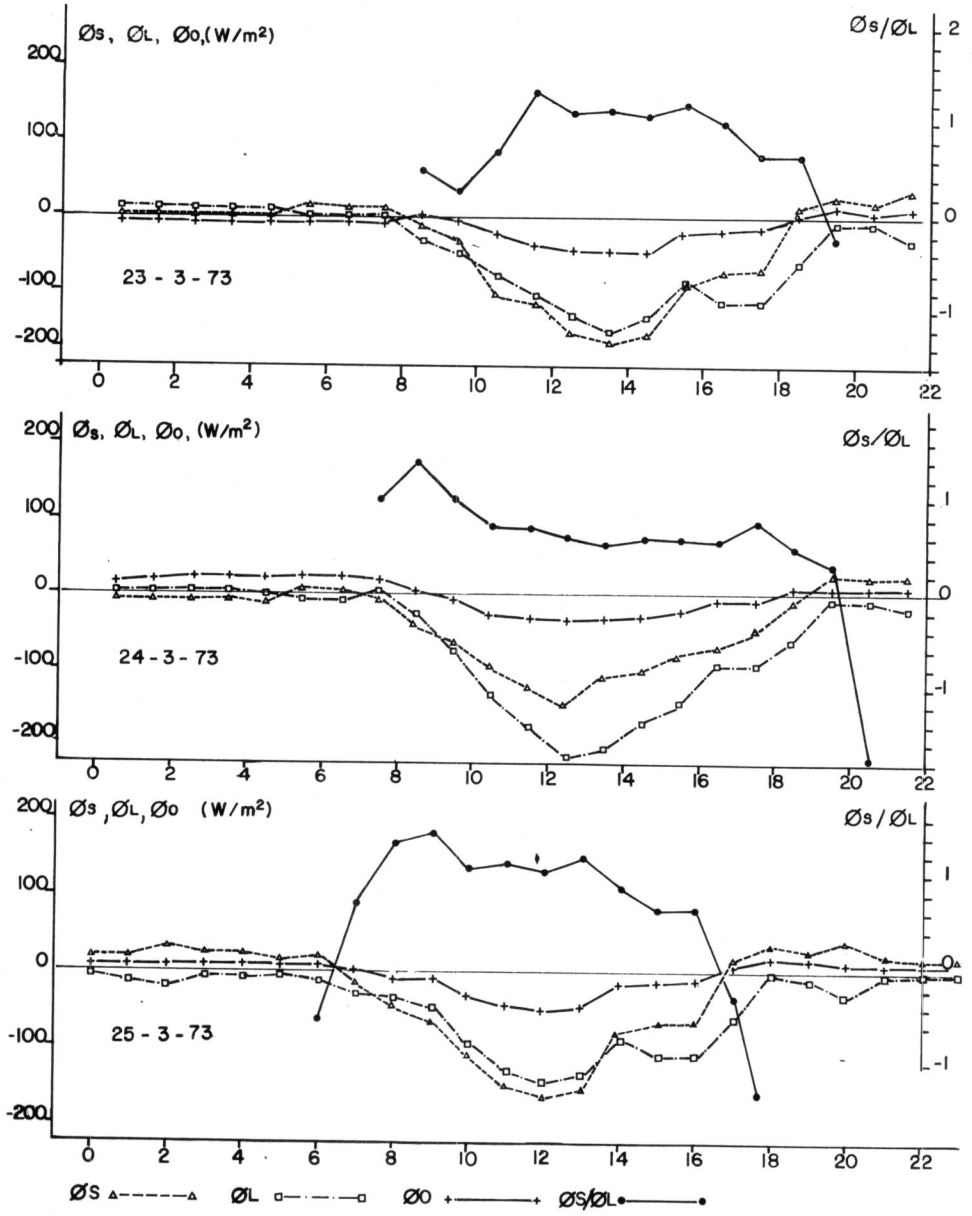
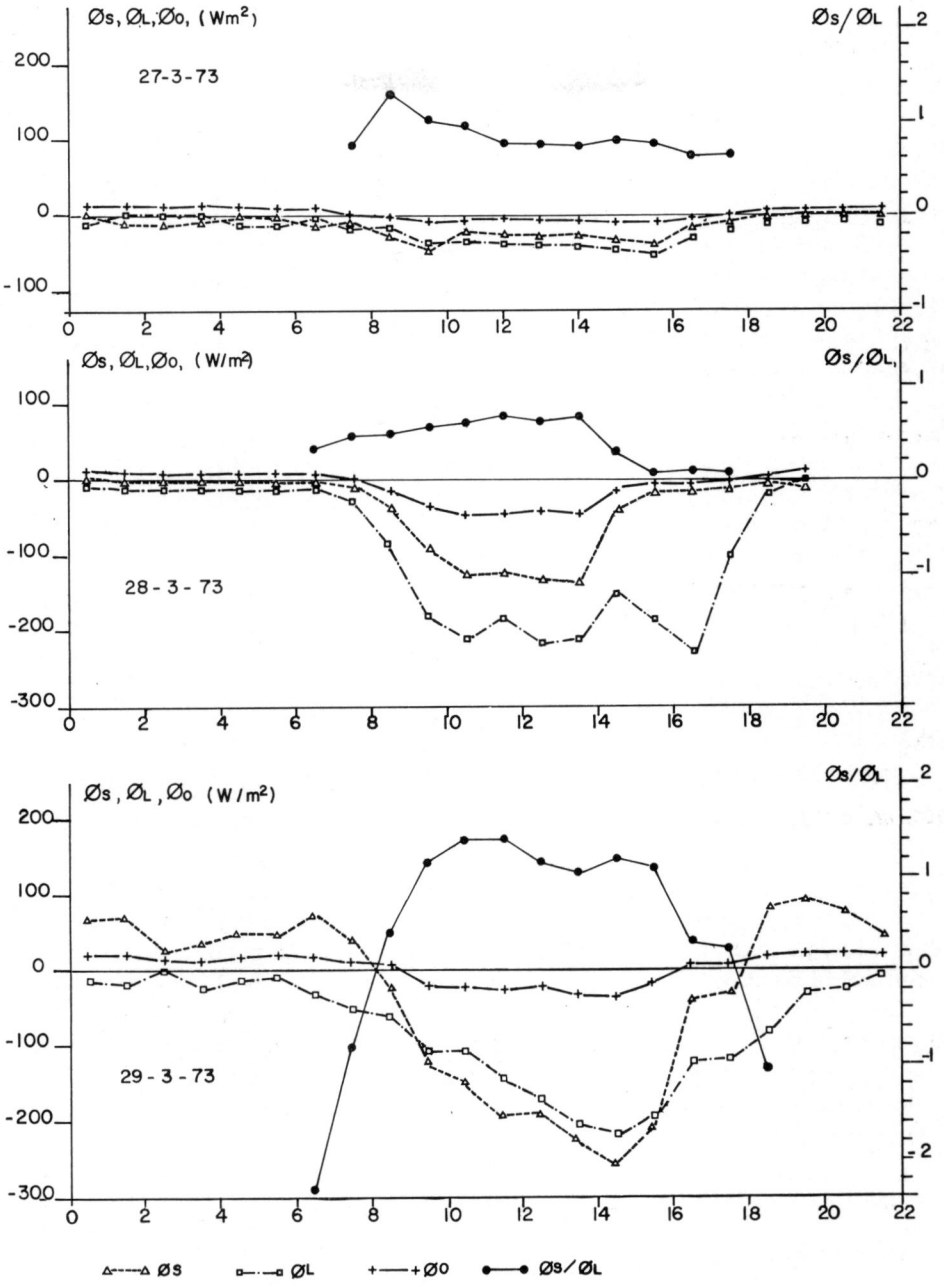


FIG. 8. — *Variation, heure par heure, de* Φ_0, Φ_s, Φ_L, *et du rapport de* BOWEN Φ_s/Φ_L *sur une luzernière à Salamanque* (Espagne)

(R*n* n'a pas été reporté sur ces graphiques, il est donné par la somme des flux).

8 *a* : 23 (RH = 67 mm), 24 (irrigation le matin, RH = 117 mm) et 25 mars 1973 (RH = 114 mm)



8 *b* : 27 (journée pluvieuse, RH = 110 mm), 28 (RH = 134 mm) et 29 mars 1973 (RH = 130 mm)

alors et de la précision de la mesure et de la fiabilité de l'appareil) est légèrement plus faible : $r = 0{,}90$.

Quant à la droite de régression, elle a pour équation :

$$Ec = 0{,}80\ Em + 0{,}33$$

(cf. fig. 7 *b*).

Sur les figures 8 *a* et 8 *b*, sont reportées les variations, heure par heure, de Φ_0, Φ_s, Φ_L et du rapport de BOWEN Φ_s/Φ_L obtenues sur une luzernière de la région de Salamanque (Espagne) pour six journées caractéristiques.

On note que :

— l'ensemble des valeurs obtenues reste cohérent même lorsque les flux demeurent faibles en raison du rayonnement net lui-même faible (fig. 8 *b* ; journée du 27-3-73) ;

— la densité de flux dans le sol Φ_0 ne dépasse pas 12 p. 100 du rayonnement net et reste généralement de l'ordre de 5 à 8 p. 100.

Le rapport Φ_s/Φ_L est généralement négatif durant la période nocturne ($\Phi_s > 0$; $\Phi_L < 0$). Durant la période diurne, dans les conditions de notre expérimentation, sa valeur dépend essentiellement de l'humidité des couches superficielles du sol, la végétation n'étant qu'à son début de croissance (luzerne). On constate en effet une opposition entre les journées de type le plus fréquent (23, 25, 29-3-73) et celles du 24 et 28 mars consécutives respectivement à une irrigation et à une journée de pluie (27-3). Dans le second cas, l'humidité de surface étant élevée, le rapport Φ_s/Φ_L est voisin de 0,6, alors que dans le premier, il est légèrement supérieur à 1. Cette influence des couches superficielles est soulignée par la faible différence des réserves hydriques entre les journées consécutives du 24-25 et du 28 et 29 mars.

4. — APPLICATION DE LA MÉTHODE A LA DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES HYDRIQUES ET AÉRODYNAMIQUES D'UN COUVERT : RÉSISTANCE, RÉSISTANCE CRITIQUE ET RAPPORT DE BOWEN

Nous nous proposons de montrer ici comment l'application de la méthode du bilan d'énergie permet d'évaluer à tout instant un certain nombre de paramètres traduisant la réaction du végétal aux conditions d'alimentation hydrique.

Les paramètres envisagés seront la résistance du couvert végétal au transfert de vapeur d'eau r_v et le rapport de Bowen, rapport des deux flux Φ_s/Φ_L. Nous nous proposons également de montrer comment la méthode conduit à la détermination d'une résistance critique r_{vc}, valeur critique de la résistance du couvert végétal r_v et qui dépend des valeurs instantanées d'un certain nombre de facteurs climatiques.

A. — *Résistance propre du couvert* r_v

Définition et signification.

La relation de PENMAN (1948) permet de connaître l'évapotranspiration potentielle théorique du couvert :

$$ETP = \frac{P'\,(Rn + \Phi_0) + \gamma Ea}{P' + \gamma} \qquad (9)$$

où Ea est l'évaporation qu'aurait le couvert si sa température était celle de l'air Ta.

$$Ea = \frac{LM}{RT} P' \left(\frac{Ta - Tr}{ra}\right) \qquad (9\ bis)$$

avec P' la dérivée de la tension de vapeur saturante pour $\frac{Ta + Tr}{2}$,

γ la constante psychrométrique,

ra la résistance aérodynamique entre la surface du couvert et le niveau de référence pour la mesure de Ta (voir note p. 21),

Si l'on veut exprimer l'évapotranspiration réelle en fonction de l'ETP, on est amené à définir une résistance supplémentaire, r_v.

Cette résistance s'applique d'une part au parcours de la vapeur d'eau de la chambre stomatique à l'extérieur de la feuille ; elle est donc étroitement liée au degré d'ouverture des stomates qui, pendant la phase diurne du moins, dépend essentiellement des conditions d'humidité du couvert végétal (régulation hydrique).

r_v exprime par ailleurs la résistance offerte globalement par la masse végétale à la diffusion de l'eau jusqu'au niveau supérieur z_h du couvert.

On obtient alors une relation de la forme :

$$ETR = \frac{P' (Rn + \Phi_0) + \gamma Ea}{P' + \gamma \left(\frac{r_a + r_v}{r_a}\right)} \qquad (10)$$

relation qui peut s'écrire :

$$ETR = \frac{ETP}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_v}{r_a}} \qquad (11)$$

B. — *Résistance critique du couvert* r_{vc}

Définition et détermination par la méthode du bilan d'énergie.

Si l'on dérive l'expression (10) par rapport à r_a, de façon à préciser le sens de variation de l'ETR avec la vitesse du vent, on peut mettre en évidence une valeur particulière de r_v, appelée résistance critique r_{vc} pour laquelle la valeur de ETR est indépendante de r_a (DAUDET et PERRIER, 1966).

$$\frac{\partial ETR}{\partial r_a} = \frac{(Rn + \Phi_0)\, P'\, \gamma\, r_v - \frac{LM}{RT} P'(Ta - Tr)(P + \gamma)}{\left(P' + \gamma + \gamma \frac{r_v}{r_a}\right)}$$

Cette expression s'annule pour la valeur particulière r_{vc}

$$r_{vc} = \frac{LM}{RT} \left(\frac{P' + \gamma}{Rn + \Phi_0}\right) (Ta - Tr) \qquad (12)$$

On notera que r_{vc} dépend d'un certain nombre de facteurs climatiques, notamment du rayonnement et du déficit de saturation de l'air, et varie par conséquent systématiquement au cours de la journée.

A cette valeur critique de r_{vc} correspond une valeur critique de l'évapotranspiration donnée par la formule :

$$(\mathrm{ETR})_c = \frac{\mathrm{P}'(\mathrm{R}n + \Phi_0)}{\mathrm{P} + \gamma}$$

On reconnaît ici le premier terme de l'équation de PENMAN (9), terme qui ne dépend que du flux de chaleur dans le sol, du rayonnement net et de la température (par P′ et γ) mais est indépendant de la vitesse du vent.

Les deux termes r_{vc} et (ETR) sont calculables directement à partir des grandeurs mesurées par le B.E.A.R.N. et pourraient éventuellement être fournis par le calculateur de l'appareil.

Si un couvert végétal est caractérisé par une résistance r_v inférieure à la résistance critique du moment, l'évaporation croît avec la vitesse du vent aux dépens du flux de chaleur sensible. Si, par contre, sa résistance r_v est supérieure à r_{vc}, c'est l'inverse qui se produit. Ce second résultat est beaucoup moins immédiat et intuitif que ne l'est le premier. Le rapport des deux flux $\frac{\Phi_s}{\Phi_\mathrm{L}}$ appelé rapport de BOWEN (1926), est donc intimement lié aux valeurs de r_v et r_{vc}.

C. — *Rapport de* BOWEN $\beta = \Phi_s/\Phi_\mathrm{L}$

Détermination par la méthode du bilan d'énergie et signification.

Ce rapport est donné directement par la méthode du bilan d'énergie.

Pour dégager sa signification, nous nous proposons de montrer ici comment il varie avec les résistances r_a, r_v et r_{vc}.

La relation (1) permet d'écrire :

$$\beta = \Phi_s/\Phi_\mathrm{L} = -\left(\frac{\mathrm{R}n + \Phi_0 + \Phi_\mathrm{L}}{\Phi_\mathrm{L}}\right)$$

En remplaçant $\Phi_\mathrm{L}(\Phi_\mathrm{L} = -\mathrm{ETR})$ par sa valeur dans (10) et en exprimant Ea en fonction de r_{vc} à partir des relations (9 *bis* (et) 12) :

$$Ea = \frac{r_{vc}}{r_a}\frac{\mathrm{P}'}{\mathrm{P}' + \gamma}(\mathrm{R}n + \Phi_0)$$

le rapport précédent s'écrit :

$$\beta = \frac{\Phi_s}{\Phi_\mathrm{L}} = \frac{\mathrm{P}' + \gamma + \gamma\dfrac{r_v}{r_a}}{\mathrm{P}' + \gamma\dfrac{\mathrm{P}'}{\mathrm{P}' + \gamma}\cdot\dfrac{r_{vc}}{r_a}} - 1 \qquad (14)$$

$$\beta = \frac{\gamma}{\mathrm{P}'} + \frac{\mathrm{P}' + \gamma}{\mathrm{P}'}\frac{r_v - r_{vc}}{\dfrac{\mathrm{P}' + \gamma}{\gamma}r_a + r_{vc}} \qquad (14\ bis)$$

Ainsi le rapport $\beta = \frac{\Phi_s}{\Phi_\mathrm{L}}$ est :

— fonction croissante de la résistance du couvert r_v,

— fonction décroissante de la résistance critique r_{vc}, et par corollaire (éq. 12), fonction croissante du rayonnement net,
fonction décroissante du déficit de saturation de l'air.

Quant à l'effet de la vitesse du vent, on retrouve l'influence indiquée précédemment de la résistance critique en considérant, soit l'équation 14 *bis*, soit la dérivée de la relation 14 :

$$\frac{\partial \beta}{\partial r_a} = \frac{P'}{\gamma} \cdot \frac{(r_{vc} - r_v)}{\left(\frac{P'}{\gamma} r_a + \frac{P'}{P' + \gamma} r_{vc}\right)^2}$$

Cette dernière équation montre en effet que, si r_v est inférieur à r_{vc}, β est une fonction croissante de r_a, donc décroissante de la vitesse du vent et vice versa.

On peut remarquer par ailleurs que, lorsque r_v est inférieur à $\frac{P'}{P' + \gamma} r_{vc} - r_a$, le rapport de BOWEN est négatif. Cela peut être très souvent le cas en début et en fin de journée, lorsque le rayonnement net étant faible, la valeur de r_{vc} est très grande. Cela signifie que, par rayonnement faible, il peut y avoir évapotranspiration, mais l'énergie nécessaire est alors en grande partie apportée par l'air ; on a alors $\Phi_s > 0$ et $\Phi_L < 0$.

D. — *Résistance propre du couvert*

Détermination par la méthode du bilan d'énergie.

Les équations (9) et (11) montrent qu'il est possible de déterminer r_v si l'on connaît simultanément les valeurs de ETP, de ETR et de r_a.

Nous nous proposons de montrer comment la méthode du bilan d'énergie permet d'accéder à la connaissance de r_v sans passer par la valeur de l'évapotranspiration potentielle ETP.

Écrivons la formule (14) sous la forme :

$$\frac{r_v}{r_{vc}} = \frac{r_a}{r_{vc}} \left(\frac{P'}{\gamma} \beta - 1\right) + \frac{P'}{P' + \gamma} (\beta + 1)$$

La valeur de r_v peut ainsi être calculée à partir des paramètres fournis par la méthode du bilan d'énergie :

— Φ_s et Φ_L

— r_{vc} obtenu indirectement au moyen de l'équation (12),

et à condition d'adjoindre une mesure de température de l'air au niveau supérieur du couvert (z_h) susceptible de donner la valeur de r_a (résistance aérodynamique comptée entre le sommet de la culture et le niveau de référence auquel est relevée la température de l'air Ta) :

$$r_a = \rho c_p \left(\frac{Ta - T(z_h)}{\Phi_s}\right)$$

A titre d'illustration, la figure 9 donne, pour une journée du mois d'avril à Salamanque (Espagne), et pour une culture de luzerne, la variation simultanée des trois termes : Φ_s/Φ_L, r_v et r_c.

On constate dans ce cas particulier que r_v :

— décroît de 8 à 9 h pour passer de la valeur de 40 à environ 10 s m^{-1} (régulation photique),

— puis croît fortement de 10 h à 12 h pour atteindre une valeur maximale de 70 s m^{-1} (régulation hydrique),
— enfin, décroît progressivement jusqu'à 17 h pour atteindre une valeur pratiquement nulle (régulation hydrique).

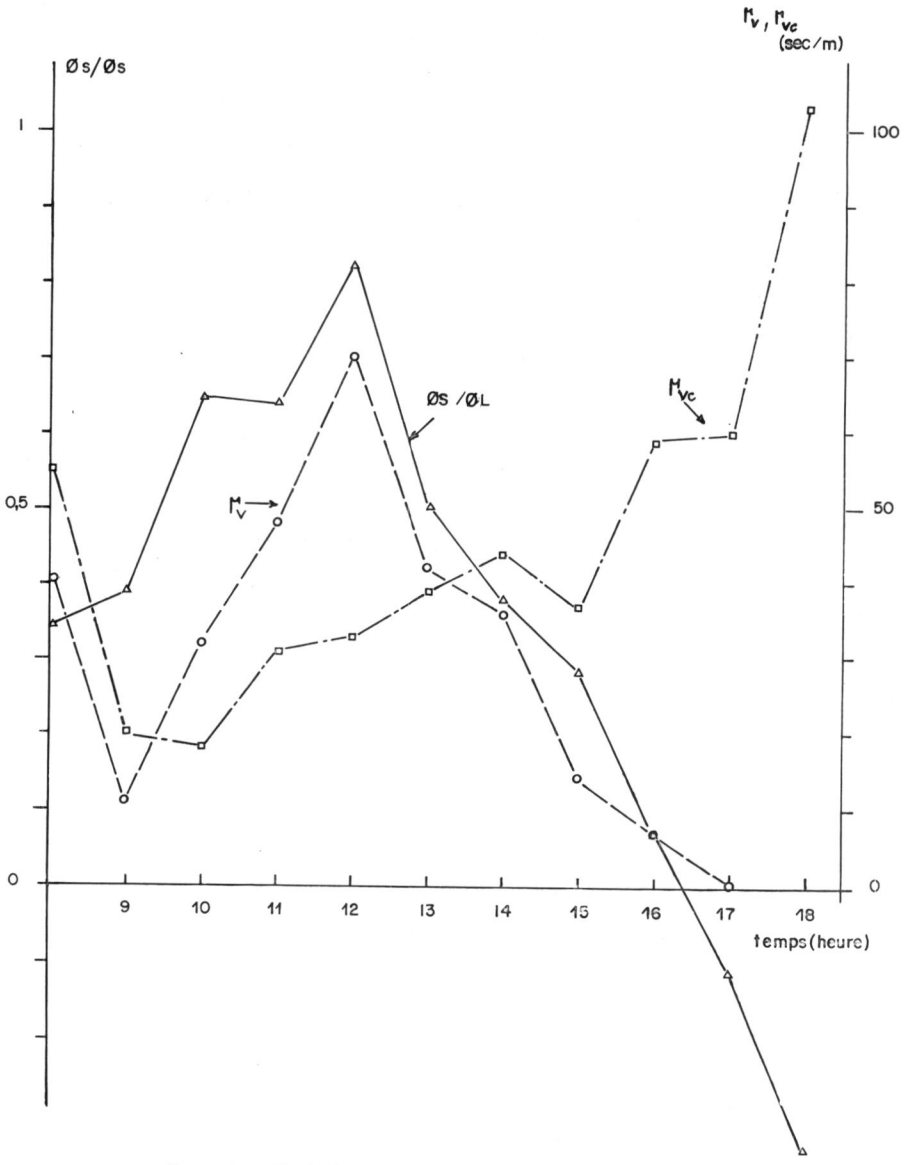


FIG. 9. — *Variation au cours de la journée du* 20-4-1973, *du rapport de* BOWEN Φ_s/Φ_L, *de la résistance du couvert* r_v *et de la résistance critique du même couvert de maïs, à Salamanque* (Espagne)

5. — APPLICATION DE LA MÉTHODE DU BILAN D'ÉNERGIE A L'ÉTUDE DU BILAN HYDRIQUE

Le déficit en eau d'un sol est donné à tout instant par la relation :

$$d = d_0 + \sum_0^t \text{ETR} + \sum_0^t (\text{D} + \text{E}) - \sum_0^t (\text{P} + \text{I})$$

où d_0 est le déficit mesuré au temps initial, ETR l'évapotranspiration réelle, D le drainage, E l'écoulement superficiel, P la pluie et I l'irrigation.

La connaissance de ETR devrait permettre :

— l'hiver, dans les régions tempérées, d'effectuer une mesure du drainage et de l'écoulement à l'échelle du bassin versant. Dans la mesure où (le sol étant perméable et les réserves reconstituées) l'humidité demeure égale à la capacité au champ et le déficit demeure par conséquent nul, on peut écrire :

$$d = d_0 \sim 0$$

$$\sum_0^t (\text{D} + \text{E}) \simeq \sum_0^t (\text{P} + \text{I}) - \sum_0 \text{ETR}$$

— l'été (sauf lorsqu'il y a de grosses averses susceptibles de provoquer un drainage et (ou) un écoulement), de connaître en permanence la valeur du déficit en eau d :

$$d \simeq d_0 + \sum_0^t \text{ETR} - \sum_0^t (\text{P} + \text{I})$$

CONCLUSION

La méthode du bilan d'énergie automatique, en dépit du coût actuel de l'appareillage qu'elle nécessite, offre une possibilité d'utilisation constante et fine du bilan d'énergie au niveau d'une culture. A l'aide de plusieurs bilans automatiques, la comparaison des évapotranspirations de diverses cultures devient alors réalisable. Le bilan d'énergie, outre l'analyse directe des pertes réelles en eau d'une culture et de son bilan hydrique, est aussi un moyen de suivre l'état physiologique de cette culture. En effet, l'étude du rapport Φ_s/Φ_L, comme il a été montré pour une culture de luzerne, permet, grâce à un complément d'analyse sommaire concernant les profils aérodynamiques, une détermination de la résistance globale de la culture à l'évapotranspiration. Cette résistance, qui traduit le rôle de la structure, mais aussi et surtout les variations dues aux résistances stomatiques, permet donc de suivre les adaptations journalières de la culture aux conditions hydriques du milieu et aux conditions climatiques ambiantes.

Le bilan d'énergie qui comprend la détermination des quatre flux, rayonnement net, flux dans le sol, flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente, prend donc un intérêt encore plus grand s'il est associé à la mesure des conditions du milieu ambiant : la température de l'air, son point de rosée et la résistance aérodynamique r_a entre la surface et un niveau de référence. Il conduit à une analyse originale des conditions de croissance et de développement de la culture puisque les caractéristiques biologiques qu'il permet d'apprécier s'appliquent à l'ensemble du couvert végétal.

Reçu pour publication en juillet 1974.

SUMMARY

AUTOMATIC MEASUREMENTS OF THE ENERGETIC BALANCE OF A CROP APPLICATION EXEMPLES

Energic balance method is widely used to determine sensible heat flux Φ_s and latent heat flux from measurements of net radiation Rn, heat flux in the soil Φ_o and wet and dry air temperature gradient above the surface.

This described automatic and numerical system includes not only the usual sensors (radiometer, fluxmeter, psychrometer, thermometer) and the jointed data system but also a mini central of calculation and management which controls all processes, prints hour by hour the four energetic balance terms in watt by meter square and the mean daily terms (fig. 5).

Under different kinds of weather very satisfactory results were obtained (fig. 6) and compared with data given by a very sensible weighing evapotranspirometer (fig. 7).

Application of these measurements to the determination of water balance of soil is obvious. Otherwise, it is underlined how the ratio Φ_s/Φ_L (fig. 8 and 9) allows to express in term of resistances the mean hourly crop reaction to water stress.

ZUSAMMENFASSUNG

AUTOMATISCHE MESSUNG DER ENERGIEBILANZ EINER KULTUR BEISPIELE DER ANWENDUNG

Die Methode der Energiebilanz wird üblicherweise gebraucht, um der fühlbaren (Φ_s) und der latenten (Φ_L) Wärmefluss im Verhältnis zur Nettostrahlung (Rn), den Wärmefluss in der Erde Φ_o und die Temperatur- und Konzentrationsgradienten des Wasserdampfes zu berechnen.

Die automatische Apparatur, die hier beschrieben wird, umfasst nicht nur die Sensoren (Nettostrahlungsmesser, Wärmestrahlungsmesser, Psychrometer, Thermometer) und die Speicherung der Daten, sondern ebenso die Geräte für Verarbeitung und Berechnung, und liefert Stund für Stunde aufgezeichnet, die vier Teile der Energiebilanz (Abb. 5).

Die bei sehr verschiedenen Wetterarten erhaltenen Resultate (Abb. 6) bleiben zufriedenstellend und es gelang, ihre Gültigkeit zu bestätigen, indem die Werte von Φ_L (latenter Wärmefluss oder Evapotranspiration) mit dieser Methode ermittelt, mit denjenigen verglichen wurden die mittels eines wägbaren Evapotranspirometers erhalten wurden (Abb. 7).

Die Anwendung dieser Messungen für die fortlaufende Bestimmung des Wasserhaushalts ist unmittelbar. Es wird ausserdem gezeigt, wie es möglich ist mit Hilfe des Verhältnisses Φ_s/Φ_L (Abb. 8 und 9) die die Rückwirkung der Pflanzendecke auf die augenblicklichen Bedingungen der Wasserversorgung als Widerstandsgrösse auszudrücken.

РЕЗЮМЕ

Автоматическое измерение энергитического баланса культуры; примеры применения.

А. ПЕРРЬЕ, Б. ИТЬЕ, Ж. М. БЕРТОЛИНИ — ВЕРСАЛЬ; А. БЛАНКО ДЕ ПАБЛОС — АГРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ САЛАМАНКА (ИСПАНИЯ)

Метод энергитического баланса применяется классически при определении тока чувствительной теплоты Φ_S и скрытой теплоты Φ_L, исходя от измерения чистого излучения R_n, тока теплоты в почве Φ_o, градиентов температуры и концентрации водных паров.

Автоматизированная аппаратура, описывающаяся в данной работе, включает не только захватывающие аппараты (балансметр, флюксметр, психрометры, термометры), но и регистрацию полученных данных, органы управления и рассчета, и регистрирует из часу в час все четыре составных энергитического баланса (Рис. 5).

Результаты полученные в самую различную погоду (Рис. 6) очень удовлетворительны и их верность была проверенна при помощи сравнения величин Φ_L (ток скрытой теплоты, или эвапотранспирация) найденных этим способом, с величинами эвапотранспирации полученными при взвешивании эвапотранспирометров (Рис. 7).

Измерения эти имеют немедленное применение для постоянного определения водного баланса. Кроме того показывается как отношение Φ_S / Φ_L (Рис. 8 и 9) позволяет выразить, в терминах устойчивости, реакцию растительного покрова на минутные условия водного питания.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bowen J. S., 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.*, **27**, 779-787.

Daudet F. A., Perrier A., 1968. Étude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. génér. Therm.*, VII (76), 353-364.

Denmead O. T., McIlroy I. C., 1970. Measurement of non potential evaporation from wheat. *Agric. Meteor.*, **7**, 285-302.

Fritschen L. D., 1965. Accuracy of evapotranspiration determinations by the Bowen ratio method. *Bull. ass. Intern. Hydrol. Sci.*, **10**, 38-48.

McIlroy I. C., 1971. An instrument for continuous recording of natural evaporation. *Agric. Meteor.*, **9**, 93-100.

Penman H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., Ser. A.*, **193**, 120-145.

Perrier A., Seguin B., 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transfert et des flux dans l'air. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A., Paris, 425-446.

Perrier A., 1970. Absorption de l'énergie radiative par un couvert végétal. Influence de celui-ci sur l'intensité des flux en présence. Application au calcul de l'évapotranspiration. In : *Rayonnement solaire et hydrométéorologie*, C. R. séance d'étude Soc. Fr. Therm., section énergie solaire, A.F.E.D.E.S., 28 p.

Perrier A., Archer Ph., Blanco de Pablos A., 1974. Étude de l'évaporation réelle et maximale de diverses cultures : dispositif et mesures. *Ann. agron.*, **25** (5), 697-731.

Perrier A., Bertolini J. M., 1974. Système de mesure automatique de l'évapotranspiration d'un couvert végétal par la méthode du bilan d'énergie (publ. interne).

PERRIER A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. II. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince ». III. Évapotranspiration réelle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (1, 2, 3).

SECK M., PERRIER A., 1970. Description d'un psychromètre à thermocouple. Son application à la mesure des gradients d'humidité. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A., Paris, 223-234.

TANNER C. B., 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crop. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 1-9.

WEBB E. K., 1965. Aerial microclimate. Chap. 2. *Meteor. Monogr.*, **6**, 27-58.

Ann. agron., 1975, **26** (1), 41-58.

QUELQUES OBSERVATIONS SUR L'ABSORPTION DU POTASSIUM, DU RUBIDIUM-86 ET DU CÉSIUM-137 PAR DES PLANTES CULTIVÉES SUR SOLUTIONS NUTRITIVES

Nicole SOUTY, R. GUENNELON et Colette RODE

Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Sur quatre végétaux cultivés en solutions nutritives, nous avons suivi l'absorption et la répartition du rubidium-86, du césium-137 et du potassium dans les différents organes ; nous avons comparé leurs comportements et avons conclu dans le cadre de ce travail que ni ^{86}Rb ni ^{137}Cs ne peuvent être considérés comme des traceurs quantitatifs de K. De plus, à partir de ces résultats, nous avons abordé le problème de radioprotection.

INTRODUCTION

L'intérêt des traceurs radioactifs dans les travaux portant sur la nutrition minérale de la plante n'est plus à démontrer ; toutefois, l'application de cette technique aux études concernant le potassium présente parfois certaines difficultés inhérantes aux radioisotopes ^{40}K, ^{42}K de cet élément : activité spécifique réduite, ou courte période ou prix de revient élevé. C'est pourquoi certains auteurs ont tenté de suivre le déplacement du potassium à l'aide d'autres radioisotopes alcalins tel ^{86}Rb de période convenable : 18 jours. Par ailleurs, ^{137}Cs présent dans les produits de fission et très dangereux par suite de sa longue période (28 ans), de son énergie élevée et de son rendement important, peut, du fait de sa ressemblance avec K, participer aux processus métaboliques des plantes dans lesquelles il pénètre, apporté par l'eau d'irrigation.

Dans les sols, compte tenu des propriétés respectives des ions alcalins vis-à-vis

des colloïdes minéraux, il ne semble pas que Rb (et Cs) puissent véritablement remplacer K. Il est par contre nécessaire, en travaillant sur des solutions (technique qui permet de supprimer des phénomènes d'adsorption sur les substrats), de comparer le comportement de Rb (et de Cs) et celui de K en vue de leur utilisation comme traceurs.

Il nous a paru donc intéressant de suivre la migration de ^{86}Rb et de ^{137}Cs dans diverses variétés de plantes et d'essayer d'établir les conditions soit d'affaiblissement de leur fixation, soit de reconcentration, car, si ^{87}Rb et ^{137}Cs sont des composants des retombées d'explosions nucléaires, le césium est aussi dangereux par sa toxicité (apparaissant pour quelques dizaines de p.p.m.).

Rappels bibliographiques

Le comportement comparé du rubidium et du potassium peut être mis en évidence par l'examen du coefficient de distribution :

$$r_{Rb/K} = \frac{\text{Concentration en Rb dans la plante}}{\text{Concentration en K dans la plante}} \times \frac{\text{Concentration en K dans la solution}}{\text{Concentration en Rb dans la solution}}.$$

Comme les végétaux ne discriminent guère le rubidium du potassium lorsqu'ils absorbent ces éléments à partir de solutions de sels purs (RbCl-KCl), ce coefficient serait généralement voisin de 1.

Plusieurs travaux ont été aussi entrepris relativement à la pénétration de ces ions à travers les membranes cellulaires au niveau des racines : dans ces cas, K et Rb semblent posséder des points communs. C'est ainsi qu'EPSTEIN (1961) pense que Rb peut être employé comme traceur du K : en effet, la pénétration à travers les membranes des cellules met en jeu des mécanismes d'absorption sélective des ions *à la condition* que Ca^{++} soit présent dans la solution en concentration convenable : certains ions très voisins peuvent alors se comporter de façon presque identique vis-à-vis de ces mécanismes.

Par contre, le problème est plus complexe quand on étudie l'absorption et le transfert de K dans une plante entière : en effet, K et Rb, après avoir été absorbés, peuvent être bloqués dans le cytoplasme alors qu'ils se déplacent à travers le symplasme. Une discrimination peut alors se faire entre les deux ions.

MENZEL et coll. (1955) trouvent d'après les valeurs du coefficient de distribution, une légère discrimination dans l'absorption du Rb et du K pour plusieurs plants et une préférence pour le Rb dans le cas des fleurs. Quelques autres auteurs pensent, de même, que K et Rb peuvent être considérés comme régis par des mécanismes de transport identiques. Ainsi CLINE et HUNGATE (1960) ont étudié sur les haricots, la variation des facteurs de discrimination Rb/K pour des quantités variables de K dans la solution nutritive. Les plants différencient Rb de K pour des faibles teneurs en K dans la solution nutritive mais cette discrimination diminue avec l'augmentation de la concentration en K. Auparavant, COLLANDER (1941) avait conclu à la faible possibilité pour la plante entière de choisir entre Rb et K quand ces deux éléments sont présents dans la solution nutritive : leurs comportements pouvaient être considérés comme identiques.

Cependant, de nombreux travaux s'opposent à ces conclusions. En 1968, WALLACE a envisagé le déplacement de ^{86}Rb et K dans les haricots. Il trouve que si Rb et K sont en quantité comparable dans les feuilles, il y a beaucoup plus de Rb dans les racines et beaucoup plus de K dans les tiges. MAAS et LEGGETT (1968) constatent, sur des racines de blé excisées, que K et Rb sont différents quant à un transport du point de vue quantitatif et directionnel. LAUCHLI et EPSTEIN (1970), pour suivre le transfert de K dans les racines de blé, utilisent simultanément deux traceurs : ^{42}K et ^{86}Rb et observent que la vitesse d'absorption du K est surestimée de 16 p. 100 environ par l'emploi du ^{86}Rb.

Par l'utilisation de ^{42}K et ^{86}Rb, MORARD et BUR (1971) ont mis en évidence sur le sorgho en solution hydroponique des différences de comportement de ces deux traceurs au niveau de leur absorption et de leur répartition dans la plante.

Quant au césium, l'étude de son comportement présente un intérêt non seulement du point de vue radioactif, mais aussi du point de vue de sa phytotoxicité apparaissant pour des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de p.p.m. De nombreux travaux envisagent donc l'absorption de ^{137}Cs par les plantes en solution nutritive, les facteurs influençant cette absorption et les conséquences en découlant. CLINE et HUNGATE (1960) considèrent le mouvement du ^{137}Cs et du K à partir d'une solution nutritive vers des plants de haricots. Le coefficient de distribution $\left(\frac{^{137}Cs}{K}\right)_{plante} / \left(\frac{^{137}Cs}{K}\right)_{solution}$ n'est pas constant dans les parties aériennes : il varie de 1 à 10, quand la teneur en K de la solution varie de 1 à 200. De plus, dans ces organes, l'augmentation de K, simultanément à la décroissance de ^{137}Cs, n'est pas suffisante pour conserver un rapport $\frac{^{137}Cs}{K}$ (plante) identique à $\frac{^{137}Cs}{K}$ (solution).

D'autre part, les concentrations en K et Cs des feuilles varient avec leur âge et leur position sur le plant ; pour un niveau faible en K de la solution, les jeunes feuilles du sommet contiennent davantage de K et de Cs que les feuilles âgées et basses ; si l'alimentation en K devient élevée, ils observent que les vieilles feuilles ont la teneur la plus élevée en K ; par contre, ils ne notent pas la même chose pour Cs.

NISHITA et coll. (1962) ont envisagé les effets du césium stable et du potassium sur la croissance de haricots ainsi que l'absorption de ^{137}Cs, de Cs stable et de K (en solution nutritive). Eux aussi constatent que, plus faible est le niveau en K de la solution, plus grande est l'absorption de la plante vis-à-vis de ^{137}Cs ; d'autre part, une augmentation de la concentration en K de la solution entraîne une valeur limite pour l'absorption de ^{137}Cs par la plante. Ces mêmes auteurs notent une augmentation de l'absorption en Cs stable, consécutive à une augmentation en Cs de la solution, et remarquent par contre, une augmentation suivie d'une diminution de l'absorption en ^{137}Cs pour une teneur constante en ^{137}Cs de la solution et un niveau en Cs stable croissant. Il est à noter que l'explication avancée pour ce dernier phénomène met en cause, pour les faibles concentrations en césium, le principe même de la dilution isotopique. Nous y reviendrons dans un travail ultérieur. En ce qui concerne le présent mémoire portant sur les interactions Rb/K et Cs/K, il doit répondre à trois types de préoccupations que nous rappelons :

— en matière de radioprotection, déterminer sur des végétaux variés dont les

organes comestibles sont des organes différents, le niveau d'accumulation de Rb et de Cs ainsi que la répartition par organe ;

— dans le même ordre d'idée, montrer s'il est possible ou non, d'attendre d'apports en potassium un effet significatif sur la contamination du végétal ;

— enfin, préciser les limites expérimentales et théoriques d'utilisation de l'un de ces deux éléments sous leur forme radioactive comme traceur du potassium.

MATÉRIEL VÉGÉTAL ET TECHNIQUES UTILISÉS

Les végétaux choisis (fraisiers, radis, haricots et salades) sont cultivés sur solutions nutritives ; les différents traitements sont rassemblés dans le tableau 1. De plus, nous avons réalisé deux séries de culture pour deux niveaux différents en Ca + Mg : soit 12,8 méq/l (nous avons effectué 5 répétitions pour chaque teneur en K) et 4,8 méq/l (avec 4 répétitions) ; dans les deux cas, le rapport Ca/Mg est égal à 2,2 et le premier niveau est considéré comme normal pour une culture hydroponique. L'ion potassium a été apporté sous formes « nitrate, sulfate et chlorure » (proportions relatives 1, 7, 14).

Nous avons mené les cultures jusqu'au stade où les parties comestibles sont consommables ; c'est ainsi que les durées des essais ont été respectivement de 54 jours et 47 jours pour les fraisiers et les haricots, et de 21 jours pour les radis et les salades. A ce moment-là, les plants ont été séparés en feuilles et parties comestibles ; sur 0,5 g de végétal séché, nous avons mesuré l'activité γ du ^{137}Cs et β du ^{86}Rb à l'aide d'une part d'un compteur non discriminant, et d'autre part, d'un compteur à flux gazeux, après avoir déterminé quantitativement l'influence de l'émission β de ^{137}Cs sur celle de ^{86}Rb. Les dosages chimiques de K, Ca et Mg ont été réalisés par émission de flamme (pour K) et par absorption atomique (pour Ca et Mg) sur une solution de minéralisation HCl-HF, selon une technique définie par un groupe de laboratoires (1973).

TABLEAU 1

Différents traitements

K (méq/l)	Cs (µg/l)	Rb (µg/l)	^{137}Cs (µCi/l)		^{86}Rb (µCi/l)		
			Fraisiers Haricots Radis	Salades	Fraisiers Haricots	Radis	Salades
1,2	1,9	18,75	0,075	0,13	0,56	0,75	0,67
1,9	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—
3,8	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—
6,3	—	—	—	—	—	—	—

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Absorption et distribution de ^{86}Rb et ^{137}Cs

Le tableau 2 comporte les teneurs en ^{137}Cs, ^{86}Rb (et K à titre de comparaison) exprimées en ml de solution par gramme de matière sèche. Les chiffres indiqués sont donc proportionnels à l'aptitude de la plante à la concentration d'un élément

donné à partir d'une solution donnée. Les résultats présentés correspondent à la plus faible concentration en K^+ des solutions (49 mg/l) qui est du même ordre de grandeur que celle des solutions du sol (0 à 50 selon les auteurs).

TABLEAU 2

Phénomènes de concentration des éléments par les plantes à partir d'une solution donnée

		Fraisiers		Radis		Haricots				Salades	
	ml de solution	Feuilles	Fruits	Feuilles	Racines principales	Feuilles	Haricots verts 1re récolte	Gousses vides	Graines	Feuilles	Racines
Ca + Mg = 12,8 méq/l	^{137}Cs	52	53	105	272	126	98	99	104	130	414
	^{86}Rb	105	153	616	705	203	344	240	337	285	408
	K	270	328	612	1 040	376	485	408	502	470	358
Ca + Mg = 4,8 méq/l	^{137}Cs	60	67	147	225	130	102	109	96	79	104
	^{86}Rb	116	150	652	533	232	325	236	314	178	224
	K	255	290	653	880	442	456	453	436	318	261

— Nous remarquons que le césium se répartit à peu près également dans les parties aériennes des plantes mais qu'il a tendance à s'accumuler au niveau des racines, principalement dans le cas des salades (fig. 1). Parmi les organes comestibles, les radis et les feuilles de salades présentent l'aptitude la plus forte à la reconcentration.

— Dans le cas du rubidium (fig. 2), ce sont encore les radis qui concentrent le plus cet élément ; en effet, un kilo de matière sèche (de la partie comestible) contient autant de ^{86}Rb que 705 litres de solution. Dans l'hypothèse d'une contamination par un radioisotope du Rb (^{87}Rb, par exemple, dont la durée de vie est de plusieurs milliards d'années), ce végétal pourra donc éventuellement faire l'objet d'une certaine surveillance ainsi que, mais à un moindre degré, les feuilles de salades et les haricots verts. A titre indicatif, nous pouvons signaler que l'activité des solutions utilisées est environ 10 fois plus élevée que la concentration maximale admissible (CMA) : $7 \cdot 10^{-5}$ µCi/ml dans le cas du ^{86}Rb, et de 3 à 6 fois plus élevée que la CMA : $2 \cdot 10^{-5}$ µCi/ml dans le cas du ^{137}Cs.

— Le comportement de ^{137}Cs et ^{86}Rb relativement aux espèces envisagées et aux organes s'accorde qualitativement avec celui du potassium, et les chiffres présentés sur le tableau 2 indiquent clairement une reconcentration en K des plants plus élevée que celle de ^{137}Cs, les valeurs pour ^{86}Rb étant en général assez voisines de celles de K. Nos résultats rejoignent ceux de CLINE et HUNGATE (1960) et de NISHITA et coll. (1962), compte tenu du niveau peu élevé en K et des concentrations en Ca et Mg. Sur les figures 1 et 2, nous avons d'ailleurs représenté pour les deux niveaux Ca + Mg, les variations des teneurs en ^{137}Cs, ^{86}Rb et K (en ml de solutions pour 1 g de matière

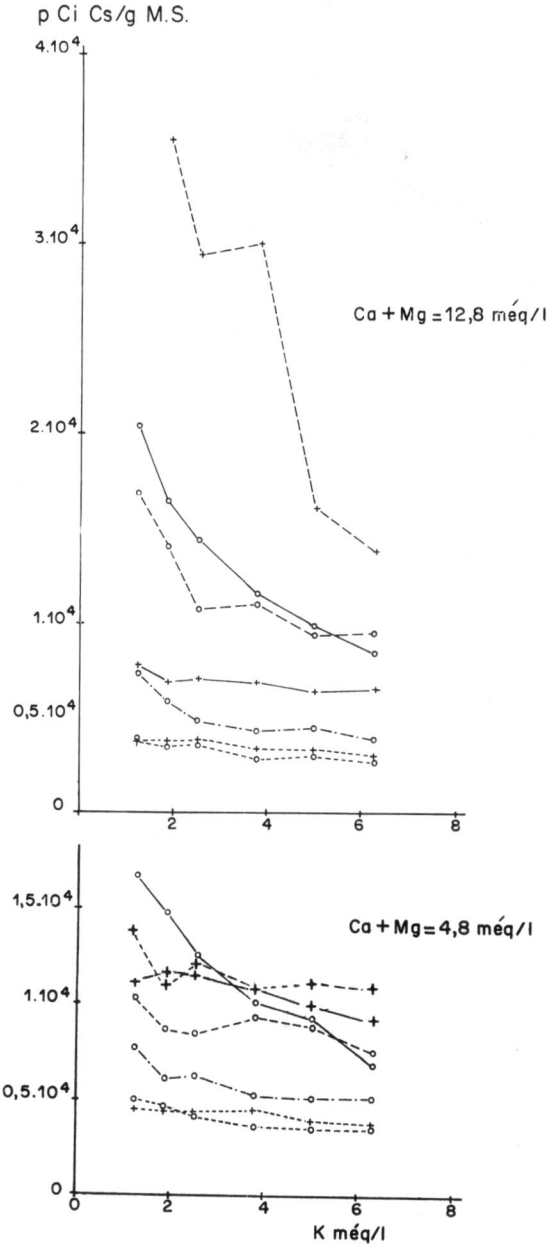


FIG. 1. — *Absorption de ^{137}Cs en fonction de la teneur en K de la solution nutritive*

Radis { feuilles +——————+ / racines ○——————○
Salades { feuilles ○— — — —○ / racines +— — — —+
Haricots verts ○— · — · —○
Fraisiers { feuilles +----------+ / fruits ○----------○

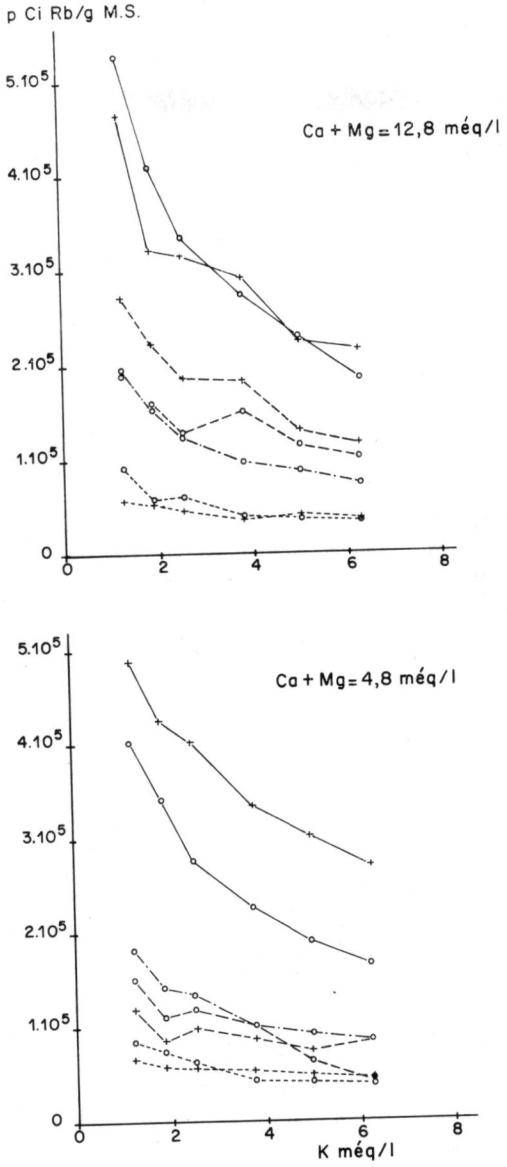


FIG. 2. — *Absorption de ^{86}Rb en fonction de la teneur en K de la solution nutritive*

Radis { feuilles +————+ / racines o————o
Salades { feuilles o— — — —o / racines +— — — —+
Haricots verts o— · — · —o
Fraisiers { feuilles +----------+ / fruits o----------o

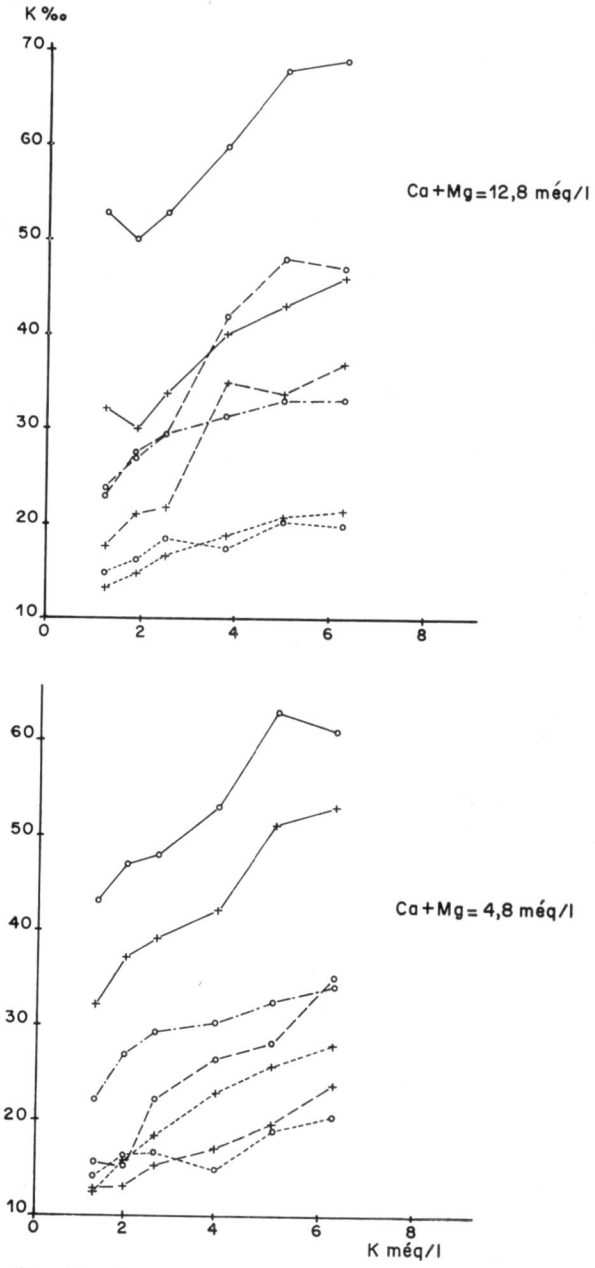


FIG. 3. — *Absorption de K en fonction de la teneur en K de la solution nutritive*

Radis { feuilles +——+ / racines ○——○
Salades { feuilles ○— — —○ / racines +— — —+
Haricots verts ○— · — · —○
Fraisiers { feuilles +----------+ / fruits ○----------○

sèche) relatives aux différents organes des végétaux, en fonction de la concentration en K (en méq/l) de la solution nutritive. Nous observons la diminution de l'absorption de ^{137}Cs et ^{86}Rb simultanément à l'augmentation de celle de K. Pour les radis (*racines comestibles*) et les racines de salades, nous notons qu'un affaiblissement de ($Ca^{++} + Mg^{++}$) dans la solution nutritive entraîne une diminution d'une part, de l'absorption du ^{137}Cs et du ^{86}Rb, d'autre part de la teneur en K. Ces résultats présentent une certaine convergence avec ceux de BANGE (1960), de ELZAM (1967), de LAUCHLI (1970) et de Mlle HOURMANT (1971). En effet sur des *racines excisées d'orge*, BANGE a trouvé une influence positive du Ca^{++} et du Mg^{++} sur l'absorption du Cs. Dans le cas de l'absorption du K, ELZAM observe que Ca^{++} inhibe cette absorption chez des racines de blé, mais pas chez celles de l'orge ou de l'avoine ; cependant, travaillant avec des durées d'immersion variables, il remarque qu'après 45 minutes, la présence de Ca^{++} exalte l'absorption du K^+. Pour la culture de radis, nous nous placerions donc dans ce domaine puisque nous évaluons l'absorption totale sur 21 jours. S'intéressant à l'absorption du ^{86}Rb et du K par des racines de blé excisées, LAUCHLI constate l'effet exaltant du Ca^{++} sur ces ions. Enfin, Mlle HOURMANT, sur des *fragments d'organes de végétaux*, a suivi l'influence du Ca^{++} sur l'absorption de ^{86}Rb. Au niveau des racines excisées, chez le maïs, l'orge, Ca^{++} exalte l'absorption de ^{86}Rb, alors que pour le pois, le taux d'absorption est très fortement diminué. Pour *divers organes*, Ca^{++} peut être inhibiteur ; c'est le cas pour des organes de réserve (pomme de terre ou betterave) ou pour des feuilles : cet effet inhibiteur se retrouve bien dans nos résultats sur les feuilles de fraisiers, de haricots et de radis pour lesquelles les calculs statistiques (par la méthode d'appariement de Student) prouvent que la différence d'absorption du ^{86}Rb et du ^{137}Cs est significative.

Exceptés les radis pour lesquels l'absorption de K est exaltée par Ca^{++} et Mg^{++}, nous remarquons que la diminution des teneurs en Ca^{++} et Mg^{++} conduit à une augmentation de l'absorption du K pour les feuilles essentiellement, alors qu'aucune différence significative n'apparaît pour les fruits (fraises, haricots). Les salades semblent se comporter un peu différemment des trois autres végétaux : en effet, Ca et Mg exaltent l'absorption de ^{86}Rb, ^{137}Cs et K au niveau des racines et des feuilles.

Les résultats de tous nos essais sont rassemblés sur les figures 1, 2 et 3.

DISCUSSION

Dans le cadre d'une contamination par ^{137}Cs ou éventuellement ^{86}Rb, il a parfois été proposé de relever le niveau d'alimentation potassique des plantes que l'on veut préserver de la contamination. Deux mécanismes peuvent être alors invoqués :

— ou bien il existe des antagonismes Cs/K et Rb/K, l'augmentation d'absorption de K freinant la contamination par les isotopes radioactifs,

— ou bien ^{137}Cs, ^{86}Rb et K ayant des comportements analogues, par suite d'un phénomène voisin de celui de dilution isotopique, les absorptions de ^{137}Cs et ^{86}Rb diminuent lorsque la teneur en potassium de la plante augmente.

1. — *Niveau d'accumulation et réduction du taux d'absorption*

Dans le premier cas, l'activité du matériel végétal peut s'exprimer par une loi de la forme $f\left(\frac{1}{C_K}\right)$ en fonction de la concentration en potassium de la solution. Sur deux essais pour lesquels les résultats expérimentaux ne présentent pas une dispersion importante, nous pouvons établir une relation de la forme :

$$^{86}Rb_v = \frac{10^4}{9{,}534\ C_K + 18{,}492} \quad \text{pour les haricots verts} \qquad (1)$$

et

$$^{86}Rb_v = \frac{10^4}{5{,}226\ C_K + 7{,}90} \quad \text{pour les racines principales des radis} \qquad (2)$$

$^{86}Rb_v$ étant exprimé en ml de solution et C_K en méq/l de solution (fig. 4).

L'efficacité d'apports de potassium est d'autant plus grande que la quantité initialement présente dans la solution est faible. Dans le cas d'une culture hydroponique normale contenant environ 4,5 méq de potassium par litre, il faudra au moins tripler la quantité de potassium pour n'obtenir qu'une diminution de 50 p. 100 de l'activité due au rubidium. Il s'ensuit que dans les sols où la nutrition potassique est suffisante, les apports acceptables de potassium n'auront qu'un effet minima sur la diminution de l'absorption du rubidium.

Dans le deuxième cas envisagé, le problème est analogue à celui qui se pose quand on tente de réduire la contamination d'un végétal par un radioisotope déterminé en augmentant l'absorption de l'élément sous sa forme stable.

Si, dans nos essais, le principe de dilution isotopique entre ^{86}Rb et K d'une part, ^{137}Cs et K d'autre part, est valable, nous devrions avoir la relation :

$$\frac{\text{Teneur en } ^{86}Rb \text{ du végétal } (^{86}Rb_v)}{\text{Teneur en K du végétal } (K_v)} = \frac{\text{Concentration de la solution en } ^{86}Rb_s}{\text{Concentration en K}(C_K)} \qquad (3)$$

ainsi qu'une relation analogue pour ^{137}Cs.

La fonction la plus simple permettant de représenter le phénomène d'absorption du potassium (K_V) sur la base de l'efficacité décroissante de l'augmentation de la concentration en K^+ dans la solution peut s'écrire :

$$K_V = K_l\ (1 - e^{-\lambda C_K}) \qquad (4)$$

C_K est la concentration en K de la solution, et K_l représente le taux d'absorption limite (λ étant un coefficient d'ajustement aux points expérimentaux). En fait, cette fonction ne rend compte des phénomènes, ni aux faibles concentrations (état de quasi-carence), ni aux fortes concentrations (état de toxicité ou de compétitivité avec les autres ions). Dans l'étude présente, nous avons limité notre recherche de modèle à une expression s'adaptant le plus parfaitement possible aux points figuratifs dont nous disposions. Nous avons pu ainsi obtenir :

$$K_V = 34\ (1 - 0{,}55\ e^{-0{,}53 C_K}) \qquad (5)$$

pour les haricots verts (fruits). Cette fonction limitée au domaine étudié est tracée sur la figure 5 (n° 3) à côté de la courbe expérimentale.

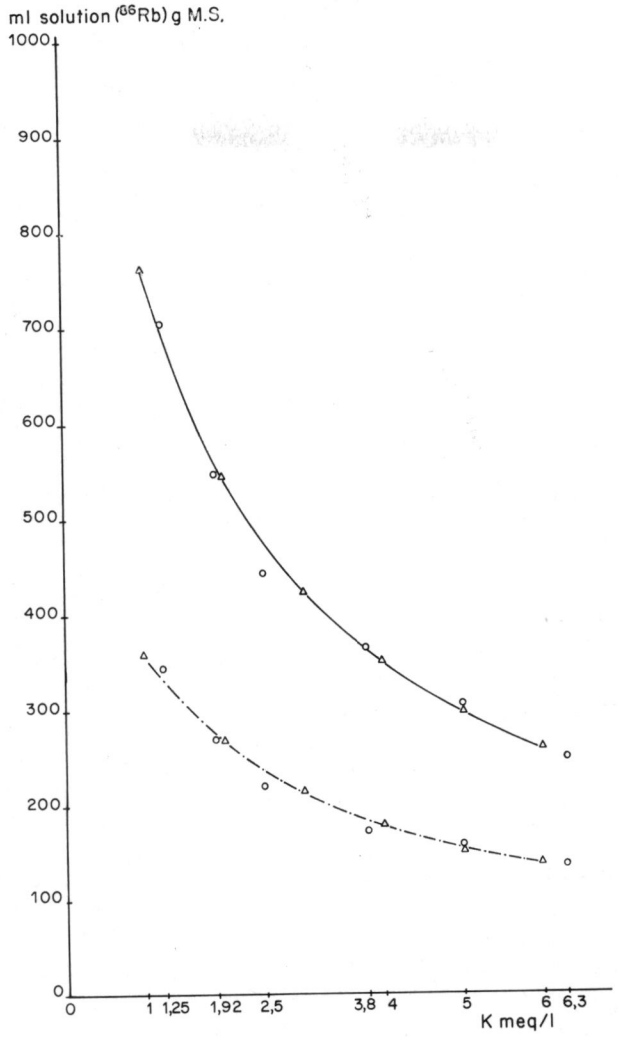


FIG. 4. — *Essai d'interprétation théorique de la décroissance de l'activité (^{86}Rb) en fonction de la teneur en K de la solution dans le cas des haricots verts et des racines de radis*

——— Radis racines
—·—·— Haricots verts
o Points expérimentaux
Δ Points théoriques

Dans ces conditions, si la relation (3) était vérifiée, la courbe d'absorption de ^{86}Rb en fonction de la teneur de la solution en potassium serait :

$$^{86}Rb_v = {}^{86}Rb_s \frac{0{,}87\ (1 - 0{,}55\ e^{-0{,}53 C_K})}{C_K} \qquad (6)$$

La représentation de cette fonction (courbe n° 2, fig. 5) ne coïncide pas avec les résultats expérimentaux. Il ne nous est pas possible, comme l'ont fait NISHITA

et coll. (1962), d'extrapoler cette courbe aux faibles concentrations en élément stable, à moins de faire une hypothèse supplémentaire sur l'allure des courbes d'absorption au voisinage de l'origine, afin de rendre compte d'une teneur très faible ou nulle en K à l'origine, ce qui n'apparaît pas dans l'équation (5). Nous pouvons donc conclure que, sur l'ensemble du domaine de C_K exploré, le principe de dilution isotopique n'est pas applicable au couple Rb/K.

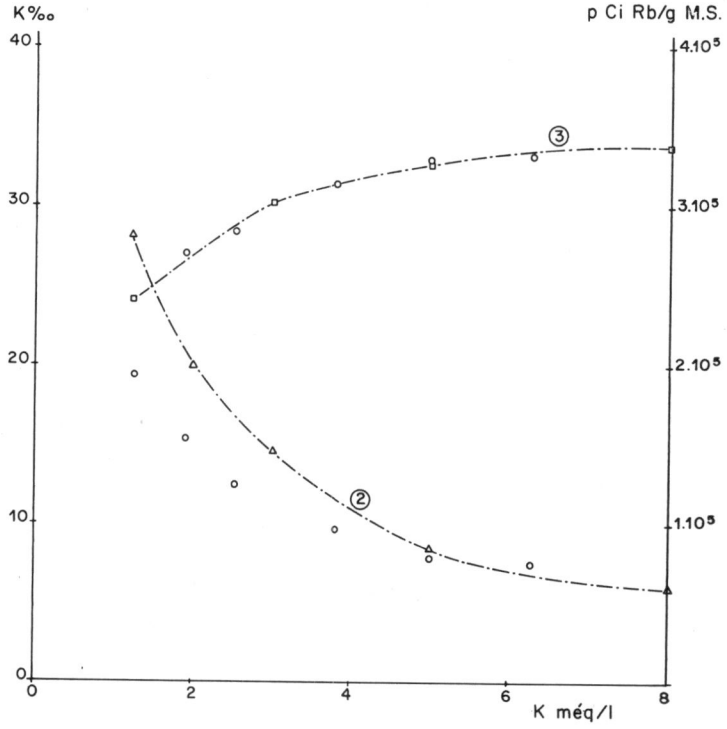


FIG. 5. — *Essai d'application du principe de dilution isotopique à partir d'une courbe théorique d'absorption de K*

— · — · — Haricots verts
○ Points expérimentaux
△ Points théoriques Rb
□ Points théoriques K

Par ailleurs, nous avons essayé d'appliquer également ce principe à l'expression :

$$^{86}Rb_v = f(C_K) \qquad (1)$$

qui s'écrit :

$$^{86}Rb_v = \frac{5{,}625 \times 10^6}{0{,}244\ C_K + 18{,}49} \qquad (7)$$

avec Rb_v en pCi g^{-1} ;
C_K en mg^{-1}.

L'application du principe de dilution isotopique nous amène à :

$$K_v = 10\ \frac{C_K}{0{,}244\ C_K + 18{,}49} \qquad (8)$$

Sur la figure 6, nous constatons que cette courbe ne correspond pas davantage aux points expérimentaux obtenus pour les teneurs du végétal en potassium.

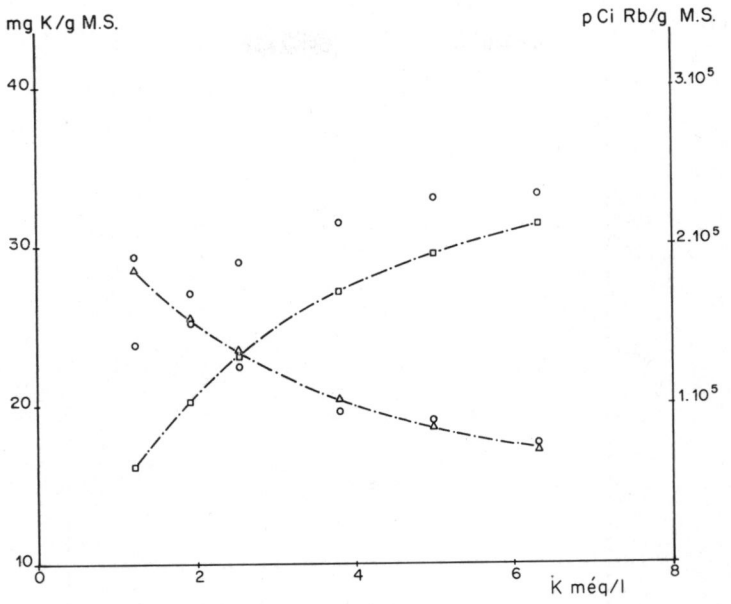


FIG. 6. — *Essai d'application du principe de dilution isotopique à partir de la fonction de la figure 4 ; détermination de l'absorption de K* (courbes 2 et 3, fig. 5)

— · — · — Haricots verts
○ Points expérimentaux
△ Points théoriques Rb
□ Points théoriques K

Nous pouvons d'autre part tenter de relier l'activité absorbée au potassium absorbé ; la figure 7 rassemble les résultats à partir desquels nous avons déterminé :

$$^{86}Rb_v = -\,12\,130\ K_v + 480\,600 \qquad \text{(haricots verts)} \qquad (9)$$

$$^{86}Rb_v = -\,11\,260\ K_v + 961\,200 \qquad \text{(racines radis)} \qquad (10)$$

Comme nous avons précédemment trouvé les expressions de $^{86}Rb_v$ en fonction de C_K (équations 1 et 2), nous déduisons de ces quatre relations :

$$K_v = \frac{9{,}69\ C_K + 269}{0{,}244\ C_K + 18{,}5} \qquad \text{(haricots verts)} \qquad (11)$$

$$K_v = \frac{11{,}44\ C_K + 8{,}3}{0{,}134\ C_K + 7{,}9} \qquad \text{(racines radis)} \qquad (12)$$

K_v et C_K sont exprimés en mg.

Ces courbes correspondent aux points expérimentaux comme il fallait s'y attendre (fig. 5). Mais ces essais d'ajustement global, basés sur le principe d'identité de comportement du potassium et du rubidium, s'avèrent infructueux et justifient le rejet des possibilités d'un tel principe.

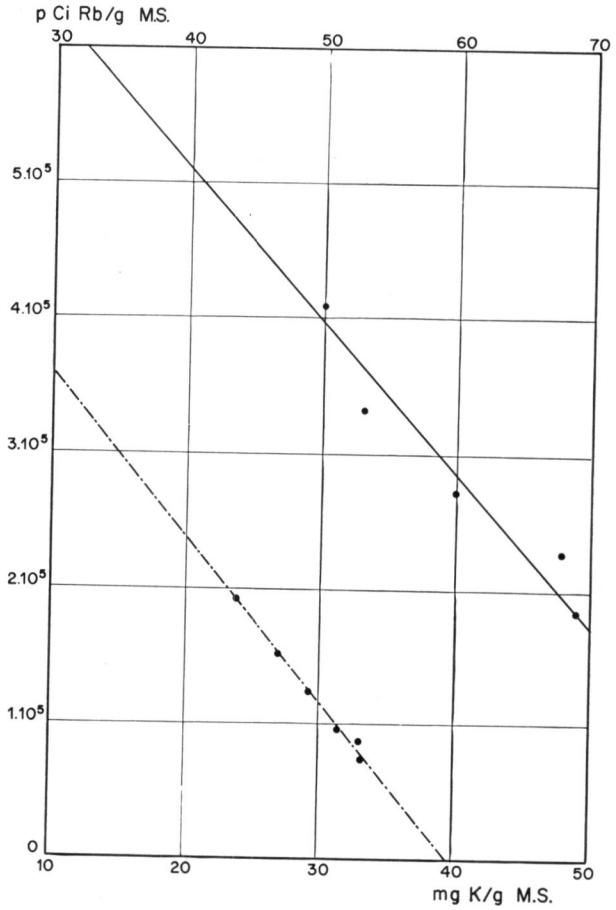


FIG. 7. — *Relation entre rubidium et potassium absorbés par un organe de végétal*

— · — · — Haricots verts ; droite théorique
——— Radis racines ; droite théorique
● Points expérimentaux

2. — *Problème de la validité de ^{86}Rb et ^{137}Cs comme traceurs du potassium*

Les coefficients $r_{Rb/K}$ (ou $r_{Cs/K}$) définis dans la première partie de ce travail, nous permettent d'aboutir à des conclusions identiques puisque leur valeur théorique devrait être très voisine de 1. Les tableaux 3 et 4 donnent les valeurs de ces coefficients par organe d'une part, pour la plante entière dans le cas des salades d'autre part. Ces coefficients, différents d'un organe à un autre et d'une plante à une autre, sont généralement inférieurs à 1 quelles que soient les concentrations en potassium. Ils augmentent avec K, ce qui signifie que les végétaux présentent une discrimination en faveur du potassium diminuant avec la concentration en potassium de la solution. Par contre, les feuilles de radis et les racines de salades ont tendance à discriminer en faveur de Rb, ou tout au moins, accusent une certaine indifférence.

TABLEAU 3

Coefficients de distribution de ^{86}Rb et ^{137}Cs chez les fraisiers et les haricots

Solution K méq/l	Fraisiers				Haricots							
	Feuilles		Fruits		Feuilles		Haricots verts		Gousses vides		Grains	
	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs
1,25	0,39	0,19	0,44	0,16	0,54	0,32	0,71	0,20	0,56	0,23	0,64	0,18
1,9	0,48	0,25	0,49	0,21	0,57	0,32	0,72	0,22	0,60	0,27	0,73	0,22
2,5	0,46	0,28	0,56	0,25	0,57	0,38	0,70	0,20	0,62	0,26	0,71	0,37
3,8	0,56	0,35	0,59	0,32	0,91	0,68	0,81	0,27	**1,31**	0,42	**1,45**	0,76
5	0,65	0,41	0,66	0,38	0,56	0,47	0,89	0,33	0,75	0,41	0,89	0,40
6,3	0,65	0,45	0,65	0,44	0,96	0,91	0,94	0,37	**1,08**	0,76	**1,31**	0,93
1,25	0,44	0,22	0,51	0,22	0,52	0,30	0,69	0,23	0,62	0,28	0,72	0,20
1,9	0,42	0,28	0,58	0,28	0,55	0,33	0,69	0,21	0,62	0,28	0,73	0,22
2,5	0,49	0,30	0,63	0,32	0,51	0,38	0,78	0,27	0,64	0,30	0,73	0,28
3,8	0,57	0,39	0,73	0,49	0,61	0,47	0,88	0,34	0,71	0,37	0,83	0,31
5	0,64	0,39	0,76	0,48	0,69	0,64	0,95	0,42	0,77	0,52	0,92	0,44
6,3	0,45	0,43	0,79	0,55	0,71	0,68	**1,00**	0,49	0,74	0,53	**1,11**	0,51

TABLEAU 4

Coefficients de distribution de ^{86}Rb et ^{137}Cs chez les radis et les salades

Solution K méq/l	Radis				Salades					
	Feuilles		Fruits		Feuilles		Racines		Plante entière	
	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs	rRb	rCs
1,25	0,95	0,15	0,66	0,27	0,60	0,27	**1,13**	**1,15**	0,66	0,38
1,9	**1,04**	0,24	0,75	0,31	0,65	0,29	**1,17**	0,96	0,74	0,37
2,5	**1,20**	0,28	0,81	0,35	0,63	0,27	**1,12**	**1,02**	0,67	0,37
3,8	**1,45**	0,32	0,90	0,38	0,80	0,30	**1,18**	0,98	0,84	0,38
5	**1,36**	0,40	0,87	0,37	0,70	0,29	**1,11**	0,71	0,78	0,34
6,3	**1,54**	0,47	0,87	0,39	0,77	0,37	**1,16**	0,70	0,84	0,42
1,25	**1,00**	0,22	0,61	0,26	0,55	0,24	0,85	0,39	0,6	0,27
1,9	**1,17**	0,30	0,71	0,30	0,61	0,32	0,97	0,48	0,67	0,35
2,5	**1,34**	0,38	0,74	0,32	0,64	0,29	**1,12**	0,59	0,69	0,33
3,8	**1,55**	0,49	0,84	0,37	0,70	0,40	**1,30**	0,72	0,77	0,41
5	**1,53**	0,48	0,78	0,38	0,75	0,47	0,92	0,86	0,78	0,53
6,3	**1,71**	0,59	0,89	0,36	0,86	0,40	0,65	0,87	0,83	0,47

En ce qui concerne le césium, la discrimination en faveur de K est beaucoup plus marquée, les rapports étant (sauf pour les racines de salades), la plupart du temps, inférieurs à 0,5.

La variation des concentrations en Ca et Mg a un effet certain mais variable sur l'intensité de la discrimination Rb/K ou Cs/K ; la diminution de Ca^{++} et Mg^{++} dans la solution augmente par exemple la discrimination en faveur de K vis-à-vis de Rb, pour les feuilles de fraisiers, alors qu'elle la réduit plutôt pour les fruits.

Tous ces résultats confirment la non validité de l'utilisation de ^{86}Rb (et de ^{137}Cs) comme traceur du potassium dans l'étude quantitative des phénomènes d'absorption et de transfert de cet élément. Tout au plus peut-on indiquer que la localisation de ces éléments se fera qualitativement avec des lois analogues, mais non strictement identiques ; les radis-feuilles et les radis-racines qui sont les plus riches en K sont aussi respectivement les parties les plus riches en ^{86}Rb ; cela n'est pas vérifiable pour ^{137}Cs. Les fraisiers (feuilles et fruits) présentent à la fois les teneurs les plus faibles en K, en Rb et en Cs.

Ces résultats et leur interprétation concordent avec ceux de travaux antérieurs : MENZEL (1955), NISHITA (1962), BOUAT (1969).

CONCLUSIONS

Il semble donc bien établi, que, en dehors de quelques applications particulières relevant d'expériences de très courtes durées (BOUAT, 1969), ni ^{86}Rb, ni, *a fortiori* ^{137}Cs ne puissent être véritablement utilisés comme des traceurs quantitatifs du potassium.

De plus, même en solutions, la discrimination des végétaux en faveur de K n'est jamais assez marquée pour que l'augmentation des concentrations, donc de l'alimentation en K, soit un moyen efficace de réduire la contamination possible, due à des radioisotopes du rubidium et du césium. Tout au plus peut-on espérer une diminution importante de la radiocontamination lorsqu'à partir d'un niveau faible d'alimentation potassique, on procède à un réajustement économiquement supportable et assurant l'optimum du coefficient d'utilisation de l'élément apporté.

Ces apports sont aussi peu efficaces sur des sols contaminés par ^{137}Cs par exemple (NISHITA, 1962) ; il est donc préférable de ne pas trop attendre de ce type d'interventions en cas d'utilisation agricole d'un sol contaminé.

Reçu pour publication en août 1974.

SUMMARY

SOME OBSERVATIONS ON POTASSIUM, RUBIDIUM-86
AND CAESIUM-137 ABSORPTION BY PLANTS GROWN ON NUTRITIVE SOLUTIONS

We followed the absorption and distribution of rubidium-86, caesium-137 and potassium in the various organs of four plants grown on nutritive solutions ; we compared their behaviour and concluded, within the limits of this research, that neither ^{86}Rb nor ^{137}Cs can be considered as quantitative tracers of K. In addition, from these results, we approached the problem of radioprotection.

ZUSAMMENFASSUNG

BEOBACHTUNGEN ÜBER DIE ABSORPTION VON KALIUM, RUBIDIUM-86 UND CAESIUM-137 VON PFLANZEN AUF NÄHRLÖSUNG

An vier auf Nährlösung kultivierten Pflanzenarten wurde die Absorption und Verteilung von Rubidium-86, Caesium-137 und Kalium in den verschiedenen Organen verfolgt. Die Verfasser verglichen das Verhalten der verschiedenen Elemente und kamen im Rahmen dieser Untersuchung zum Schluss, dass weder ^{86}Rb noch ^{137}Cs als quantitative Anzeiger des Kaliums betrachtet werden können. Ausserdem wurde an Hand dieser Resultate das Problem des Strahlenschutzes erörtert.

РЕЗЮМЕ

Некоторые наблюдения над поглощением калия, рубидия^{86} и цезия^{137} растениями на питательных растворах.

СУТИ Н., ГЕННЕЛОН Р., РОД К.

На четырех видах растений, выращиваемых на питательных растворах изучались поглощение и распределение Рубидия^{86}, Цезия^{137} и Калия в различных органах; сравнение поведения этих элементов позволило заключить что в кадре данной работы ни Рубидий^{86}, ни Цезий^{137} не могут рассматриваться как количественные индикаторы Калия. Кроме того, исходя от полученных результатов изучалась проблема радиозащиты.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BANGE G. C. J., OVERSTREET ROY, 1960. Some observations on absorption of cæsium by excised barley roots. *Plant Physiol.*, **35**, 605-608.

BOUAT M., 1969. L'utilisation du potassium 40 et potassium 42 en Agronomie. *Ann. agron.*, **20** (1), 89-104.

CLINE J. F., HUNGATE F. P., 1960. Accumulation of potassium, cæsium 137 and rubidium 86 in bean plants grown in nutrient solutions. *Plant Physiol.*, **35**, 826-829.

COLLANDER R., 1941. Selective absorption of cations by higher plants. *Plant Physiol.*, **16**, 691-720.

ELZAM O. E., HODGES T. K., 1967. Calcium inhibition of K absorption in corn roots. *Plant Physiol.*, **42**, 1483-1488.

EPSTEIN E., 1961. The essential role of calcium in selective cation transport of plant cells. *Plant Physiol.*, **36**, 437-44.

HOURMANT Annick, PENOT M., 1971. Étude comparée de l'absorption du ^{86}Rb par différents organes végétaux en présence de Ca. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **273**, 20.

LAUCHLI A., EPSTEIN E., 1970. Transport of K and Rb in plant roots. *Plant Physiol.*, **45**, 639-641.

MAAS E. V., LEGGETT J. E., 1968. Uptake of ^{86}Rb and K by excised maize roots. *Plant Physiol.*, **43**, 2054-2056.

MENZEL R. G., HEALD W. R., 1955. Distribution of K, Rb, Cs, Ca and Sr within plants grown in nutrient solutions. *Soil Sci.*, **80**, 287-293.

MORARD P., BUR R., 1971. Comparaison de l'utilisation du ^{86}Rb et du ^{42}K comme traceurs radioactifs pour l'étude de l'absorption du potassium par le sorgho. *Isotope and radiation in soil-plant relationships including forestry. Proceedings of a Symposium, Vienna, decembre 1971, I. A. E. A.*

NISHITA H., DIXON D., LARSON K. H., 1962. Accumulation of Cs and K and growth of bean plants in nutrient solution and soils. *Plant and Soil*, XVII, 221-242).

COMMUNICATION DU C. I. I. présentée par PINTA M., 1973. Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux : détermination des éléments Ca, Mg, Fe, Mn, Zn et Cu par absorption atomique. *Oléagineux*, n° 2, 87-92.

Ann. agron., 1975, **26** (1), 59-74.

ACTION COMPARÉE DE L'ALIMENTATION AZOTÉE SUR LA CROISSANCE DU SYSTÈME RACINAIRE ET DES PARTIES AÉRIENNES DES VÉGÉTAUX

F. LEMAIRE

avec la collaboration technique de Nicole DRIARD

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

La comparaison de l'action de l'azote sur les parties aériennes et sur les racines de ray-grass est réalisée à l'aide de cultures en pots sur des milieux variés (sol et solution), dans des conditions climatiques naturelles ou contrôlées.

La réaction des racines à l'azote est semblable à celle des parties aériennes mais leur maximum de croissance est obtenu avec une alimentation azotée moindre.

Les différents paramètres climatiques étudiés (durée du jour, éclairement, thermopériode) interviennent en conditionnant la quantité maximum de racines, en jouant plus sur les racines que sur les parties aériennes, en faisant varier la dose d'azote responsable du maximum, plus pour les racines que pour les parties aériennes.

INTRODUCTION

L'action des facteurs de croissance a surtout été étudiée sur les parties aériennes des plantes ; le nombre restreint d'observations sur les racines peut s'expliquer par les difficultés rencontrées dans l'obtention de cette partie du végétal.

Notre objectif est de comparer l'effet d'un facteur trophique, l'azote, sur la croissance des racines et des parties aériennes de végétaux placés dans diverses conditions climatiques et de préciser si à l'optimum du rendement des parties aériennes correspond le maximum de croissance des racines.

I. — DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Avant d'étudier les divers facteurs susceptibles d'agir sur les racines, il a été nécessaire de mettre au point des techniques d'observation et de choisir des paramètres de mesure, en tenant compte de données bibliographiques.

1. — *Techniques d'observation des racines*

a) *Observations des racines* in situ.

Diverses techniques de prélèvement et d'observation ont été décrites : ROGERS (1932), HÉNIN *et al.* (1960), GRAS (1961), SCHUURMAN et GOEDEWAGEN (1965), WIERSUM (1967), BONZON et PICARD (1969), GOODERHAM (1969), HUGUET (1973), etc. Les difficultés de récolter et d'individualiser les racines appartenant à une même plante, exception faite des arbres, ont amené les chercheurs à opérer dans des volumes définis.

b) *Cultures en pots.*

Dans ce cas, l'ensemble des racines peut être obtenu ; la vitesse de croissance et la morphologie des racines peuvent être plus facilement observées : LADONINA (1968), TAYLOR (1970). Il faut cependant remarquer que les systèmes racinaires des plantes cultivées dans des volumes définis peuvent être très différents de ceux observés sur des plantes *in situ* ; ceci est particulièrement vrai dans le cas de cultures en solutions nutritives.

2. — *Paramètres de mesure*

Quelle que soit la technique d'observation des systèmes racinaires, il faut choisir des paramètres de mesure pour apprécier l'importance des racines.

Plusieurs paramètres ont été étudiés :

— le volume des racines : ELLIS et BARNES (1967), HACKETT (1969) ;
— le poids des racines : TROUGHTON (1957), MAERTENS (1970), EVANS (1970) ;
— la longueur des racines : NEWMANN (1966), TRI (1969) ;
— le nombre des racines sectionnées sur une coupe verticale de sol : HÉNIN *et al.* (déjà cité), LEMAIRE (1966).

3. — *Facteurs d'ordre externe agissant sur les racines*

a) *Conditions climatiques.*

La lumière et la température, dans certaines limites, favorisent la croissance et la rhizogénèse : GAUTHERET (1961), KLEINENDORST et BROUWER (1965), PÉRIGAUD (1967), BROUWER et DEWITT (1969).

b) *Conditions physiques du milieu de culture.*

Celles-ci conditionnent largement la croissance du système racinaire. On peut rappeler à ce sujet les travaux de :

GRAS (1962) sur la texture et la structure,
MAERTENS (1964) sur la porosité,

PÉRIGAUD (déjà cité) sur l'oxygénation du milieu,
MOULINIER (1968) sur la salinité,
THORUP (1969) sur la teneur en eau du sol.

Si ces conditions n'atteignent pas un niveau suffisant, elles limitent l'action des autres conditions du milieu.

c) *Conditions trophiques.*

Tous les éléments nutritifs ont une action plus ou moins grande sur la croissance des racines. Les travaux de RUSSELL (1937), GOODEWAGEN (1937), EATON (1949) et PARIS (1969) ont reconnu une action favorable du phosphore alors que la plupart des auteurs (HAAS, 1958 ; HARRIS, 1968) estiment que le potassium a peu d'influence.

Quant à l'azote, de nombreux auteurs démontrent que le poids des racines augmente avec les apports effectués au champ (RUSSEL, déjà cité ; HAAS, 1958 ; GOETZ, 1969). Dans des cultures en pots, LADONINA (déjà cité) a observé un ralentissement de la croissance des racines. NOSSBERGER *et al.*, (1968) concluent que l'azote augmente plus la croissance des parties aériennes que celle des racines.

La concentration en azote nitrique joue sur la morphologie des racines cultivées en solutions nutritives (BLANC-AICARD, 1958).

Des possibilités d'interactions entre les variables climatiques et l'alimentation azotée sur le poids des racines ont été étudiées : une élévation de température au-delà de l'optimum diminue le poids des racines, l'augmentation de la dose d'azote et l'emploi de la forme ammoniacale renforçant cet effet (STOIN, 1968) ; NOVAKOWSKI *et al.* (1966) ont montré qu'à fortes doses et avec une intensité lumineuse suffisante, l'azote ammoniacal est mieux utilisé que l'azote nitrique.

En définitive, il apparaît que l'azote est le facteur trophique le plus important et que certaines interactions avec des facteurs climatiques sont à préciser.

II. — MATÉRIEL ET TECHNIQUES UTILISÉS

1. — *Matériel*

a) le végétal cultivé est le ray-grass hybride var. Io,
b) le sol est l'horizon B d'un sol de limon dont les caractéristiques physiques et chimiques ont été données dans une publication antérieure (LEMAIRE, 1972).

2. — *Techniques de culture*

a) *Sous abri vitré.*

— *Sur sol :* la technique des vases de végétation (CHAMINADE, 1960) a été employée ; les pots en matière plastique peuvent contenir 1000 g de sol.
— *En solution nutritive sur substrat inerte constitué par du silex broyé* (LEMAIRE, 1971).

b) *En conditions climatiques contrôlées.*

Les essais ont été effectués uniquement sur sol dans une cellule climatique où pouvaient être contrôlés les facteurs suivants : intensité de l'éclairement, durée du jour, température et hygrométrie de l'air. Des tubes Sylvania Grolux constituaient la source lumineuse.

3. — *Technique de détermination du poids des racines*

a) *Récupération des racines.*

Quelle que soit la technique de culture utilisée, les racines sont séparées du substrat humide au moyen d'un trempage dans l'eau permutée. Les eaux de lavage passent sur un tamis de 2 mm de manière à récupérer le maximum de racines. Les racines sont séchées dans une étuve à 70°C, pesées après vérification de l'absence de corps minéraux grossiers. Le poids brut est ainsi obtenu.

b) *Détermination du poids exact des racines.*

La technique de HARRIS (déjà cité) a été utilisée en adoptant les modifications suivantes de manière à pouvoir réaliser des dosages répétés d'éléments minéraux et déterminer l'azote total sur un même échantillon de racines :

La totalité des racines est broyée et la détermination du résidu minéral est effectuée sur une prise aliquote de 1 g matière sèche de la façon suivante :

— détermination de la matière sèche 105°C, soit le poids P ;
— première calcination ; pesée, soit le poids P_1 ;
— reprise des cendres sur filtre par une liqueur acide ;
— deuxième calcination ; pesée, soit le poids P_2.

Le poids P_2 donne le poids des résidus minéraux présents dans la prise d'essai ; la différence $P - P_2$ est le poids réel de racines contenu dans la prise d'essai ; la différence $P_1 - P_2$ représentant le poids des cendres peut être calculée.

Cette technique a permis de voir que le poids de résidu minéral dépendait :

— de la nature et de la granulométrie du substrat employé dans la culture : la présence d'éléments fins amène une plus grande surcharge minérale des racines ;
— du poids des racines : plus le poids des racines est élevé, plus la surcharge minérale est forte (tabl. 1). Le pourcentage de résidu minéral reste sensiblement constant quel que soit le poids des racines ;

TABLEAU I

Coefficients de corrélation r et équations de régression calculés entre le poids de résidu et le poids réel de racines pour deux quantités de sol présentes dans le même volume

Poids limon (g)	*r*	Équation de régression	Nombre d'observations
1000	0,66*	$Y = 0{,}172\ X - 0{,}054$*	47
500	0,44*	$Y = 0{,}048\ X + 0{,}186$*	52

* : significatif au seuil 1 p. 100.

— de la quantité de substrat présente dans le volume offert au développement des racines. Pour un même poids réel de racines, la surcharge minérale croît avec la quantité de sol présente dans le pot (tabl. 1). Elle reflète le nombre de contacts des racines avec les particules de sol.

L'emploi de cette technique permet de déterminer le poids réel des racines récupérées.

III. — COURBES DE RÉPONSE DES RACINES ET DES PARTIES AÉRIENNES A L'ALIMENTATION AZOTÉE

Pour mettre en évidence les effets de l'alimentation azotée sur les racines, le principe des courbes de réponse a été retenu ; il permet d'étudier l'action d'un seul facteur, les autres étant maintenus constants et à un niveau suffisant.

Les conditions climatiques observées pendant les essais sont données dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Conditions climatiques observées pendant les essais

Type d'essai	N° de la coupe	Température maximale moyenne (°C)	Température minimale moyenne (°C)	Radiation globale journalière moyenne (en Cal)	Durée moyenne du jour (h)
Essai en solution	C_1	23	10	433	15
Premier essai sur sol	C_1	26	10	466	15
	C_2	27	12	429	16
	C_3	29	14	449	16
Deuxième essai sur sol	C_1	23	10	471	15,30
	C_2	25	12	428	15,30

1. — *Courbes de réponse obtenues en solution nutritive*

Des courbes de réponse à l'alimentation azotée sous forme nitrique ont été réalisées en solution nutritive sous abri vitré. Les concentrations d'azote nitrique allaient de 6 à 300 mg azote/litre. La récolte des racines a été effectuée lors de la première coupe, soit après trente jours de culture.

La figure 1 donne les courbes de réponse des parties aériennes et des racines.

Pour les parties aériennes, le maximum de rendement est obtenu avec 200 mg azote/litre.

Quant aux racines, leur poids augmente, passe par un maximum puis décroît lentement. Le poids de racines le plus élevé se situe à 50 mg N/litre ; il est significativement différent des autres mesures.

Il n'y a donc pas correspondance des deux maximum ; l'action dépressive de l'azote apparaît plus vite pour les racines que pour les parties aériennes.

L'effet de l'azote est plus important sur les parties aériennes que sur les racines car le rapport $\frac{\text{parties aériennes}}{\text{racines}}$ augmente avec les doses d'azote apportées.

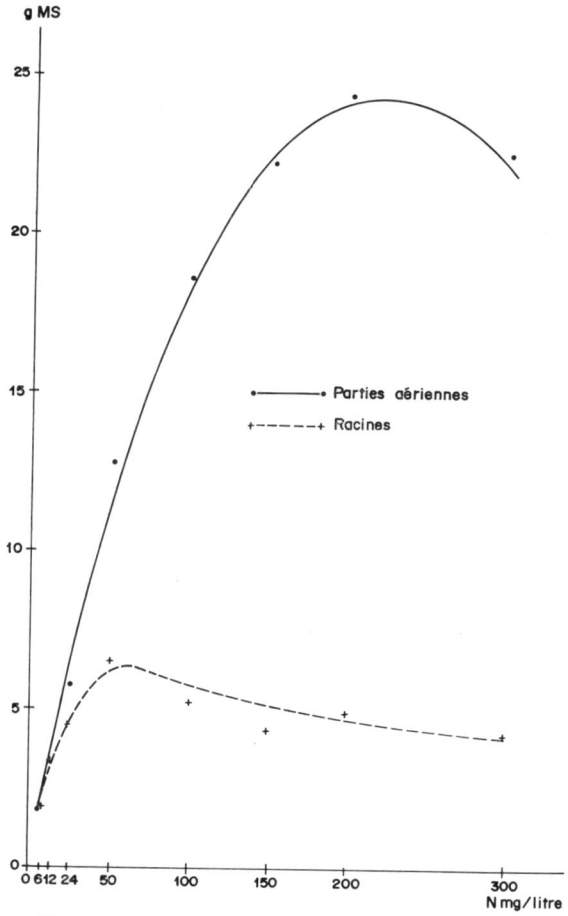


FIG. 1. — *Courbes de réponse des parties aériennes et des racines à l'alimentation azotée en solution nutritive*

2. — *Courbes de réponse obtenues sur sol*

Des essais en vases sur sol de limon ont été effectués en apportant chaque semaine des doses d'azote nitrique variant de 0 à 300 mg/semaine. Les racines ont été récoltées après trois coupes des parties aériennes.

La figure 2 montre les courbes de réponse des parties aériennes et des racines.

Dans le cas des parties aériennes, la courbe est entièrement décrite. Un palier apparaît entre 120 et 240 mg N/semaine (les rendements correspondants aux doses 120-180-240 ne sont pas significativement différents).

Le poids des racines croît avec la dose d'azote apportée jusqu'à un maximum (significativement différent des autres points de la courbe) correspondant à la dose 60 mg N/semaine, puis diminue régulièrement.

Le décalage des doses d'azote correspondant aux maximum de racines et de parties aériennes apparaît comme précédemment. Les parties aériennes réagissent plus que les racines à l'azote.

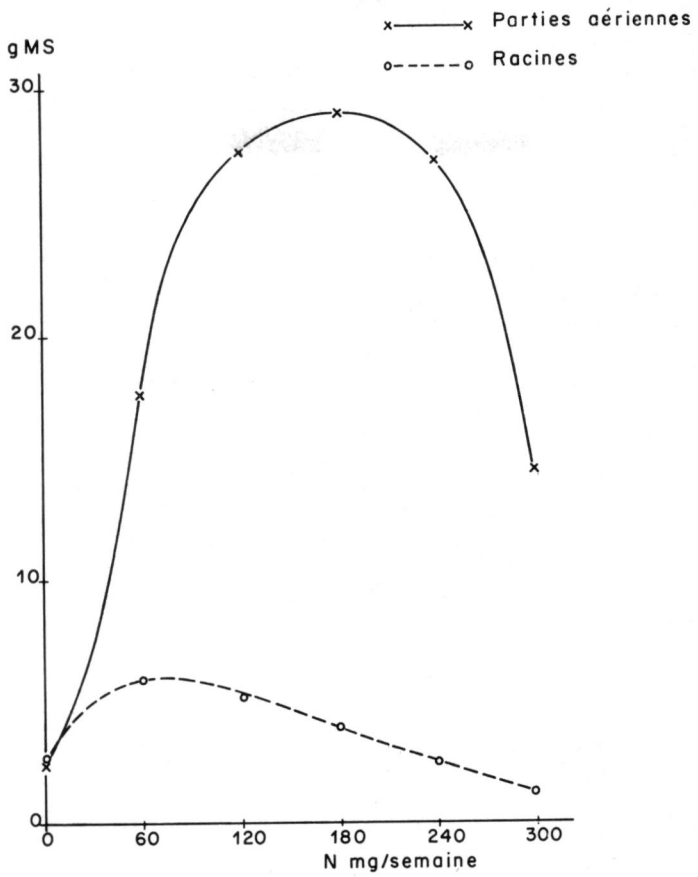


FIG. 2. — *Courbes de réponse des parties aériennes et des racines à l'alimentation azotée sur sol*

3. — *Influence des coupes successives sur la forme des courbes de réponse des racines et des parties aériennes*

L'essai suivant a été réalisé sur sol en vases de végétation sous abri vitré : huit doses d'azote nitrique allant de 0 à 210 mg N/semaine ; récolte des racines après la première coupe sur la moitié des répétitions de chaque dose d'azote ; récolte des racines après la troisième coupe sur l'autre moitié.

Les résultats sont donnés dans la figure 3.

Une analyse de variance montre que l'effet de la dose d'azote sur les poids des parties aériennes et sur ceux des racines est hautement significatif ; que les rendements des parties aériennes en première coupe sont différents de ceux obtenus en troisième coupe à partir de la dose 60 mg N/semaine ; que les poids des racines en première coupe sont différents de ceux observés en troisième coupe et que l'interaction entre les résultats des deux coupes n'est pas significative.

A la première coupe C_1, les parties aériennes augmentent avec la dose d'azote

sans atteindre le maximum de rendement. Le poids des racines passe par un maximum pour 120 mg N/semaine.

A la troisième coupe C_3, le plateau des rendements des parties aériennes s'établit à partir de 150 mg N/semaine alors que le poids des racines marque un palier entre 60 et 150 mg N/semaine.

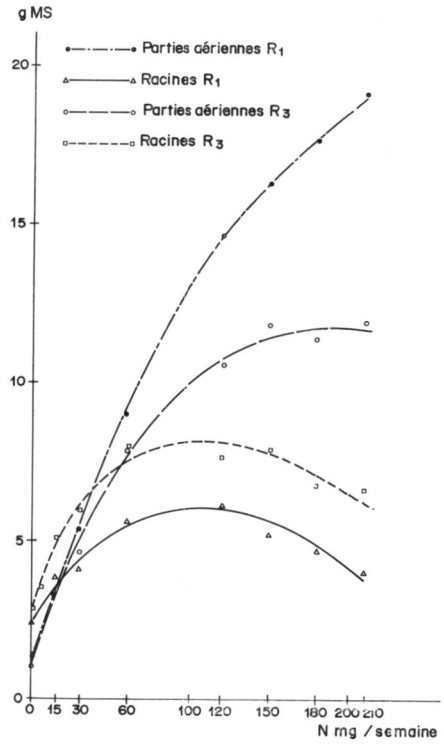


FIG. 3. — *Influence de la coupe des parties aériennes sur les courbes de réponse des parties aériennes et des racines*

Les conclusions sont les suivantes :

— le décalage entre les maximum de poids des parties aériennes et de racines apparaît quel que soit le numéro de la coupe ;

— le poids des racines a augmenté de 42,6 p. 100 entre la première et la troisième coupe ;

— l'effet de l'azote est plus marqué sur les parties aériennes que sur les racines car le rapport $\frac{\text{parties aériennes}}{\text{racines}}$ augmente ;

— le fait de couper les parties aériennes ne provoque pas de changement dans la forme de la courbe de réponse des racines.

IV. — INTERACTIONS DES FACTEURS CLIMATIQUES ET DE L'ALIMENTATION AZOTÉE

1. — *Principe des essais*

Des courbes de réponse à l'alimentation azotée ammoniaco-nitrique ont été obtenues sur sol de limon dans une cellule climatique. Les trois facteurs suivants pouvaient varier : durée de l'éclairement L, éclairement E, thermo-période T.

L'effet de chaque facteur a été testé à deux niveaux : limitant et voisin de l'optimum.

2. — *Essais réalisés*

Six essais ont été effectués dans les conditions indiquées au tableau 3.

Les éclairements ont été mesurés à une distance de 20 cm. Les racines et les parties aériennes ont été soumises aux mêmes conditions de thermopériode.

TABLEAU 3

Conditions climatiques réalisées dans la cellule climatique

E (lux)	T (°C)	L (h)	N° courbe
12 000	20-15	16	courbe I
12 000	30-25	16	courbe II
4 000	20-15	16	courbe III
12 000	20-15	8	courbe IV
12 000	30-25	8	courbe V
4 000	20-15	8	courbe VI

Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions de degré hygrométrique (80 p. 100), de densité de peuplement (60 plantes par pot de 100 cm² de section), d'alimentations hydrique et minérale (sauf l'azote), de durée de cultures (30 jours entre deux coupes). Une permutation journalière a été effectuée de manière à ce que chaque pot occupe successivement tous les emplacements dans la cellule climatique. La température de l'eau d'arrosage était celle qui régnait pour l'essai considéré.

Les racines ont été récoltées après la deuxième coupe sauf dans le cas de la courbe VI où la récolte a eu lieu après la première coupe. Les rendements des parties aériennes sont ceux obtenus lors de la deuxième coupe.

3. — *Résultats*

a) *Parties aériennes* (fig. 4).

Les six courbes de réponse correspondant aux conditions du tableau 3 comprennent les zones de carence, de l'optimum et de toxicité. L'optimum de l'alimentation azotée varie avec les conditions climatiques.

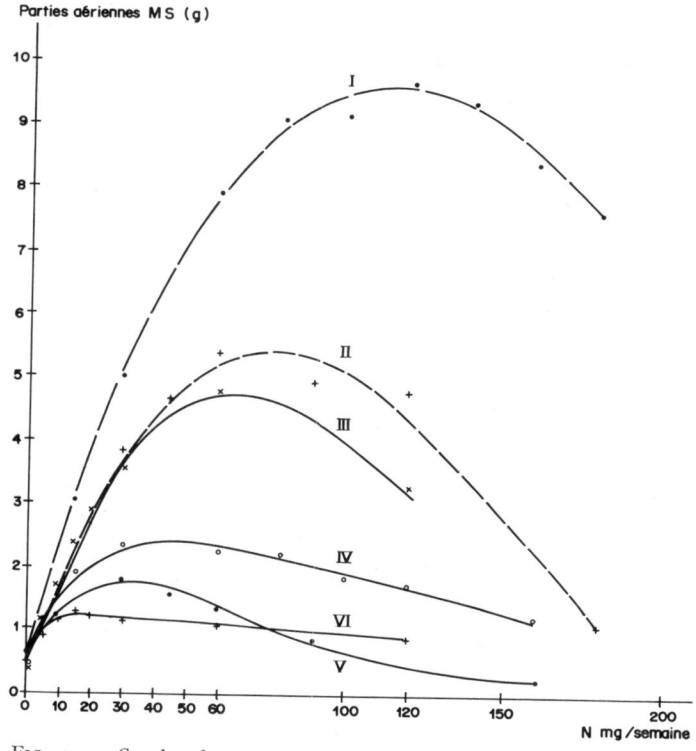


FIG. 4. — *Courbes de réponse des parties aériennes à l'alimentation azotée dans différentes conditions climatiques*

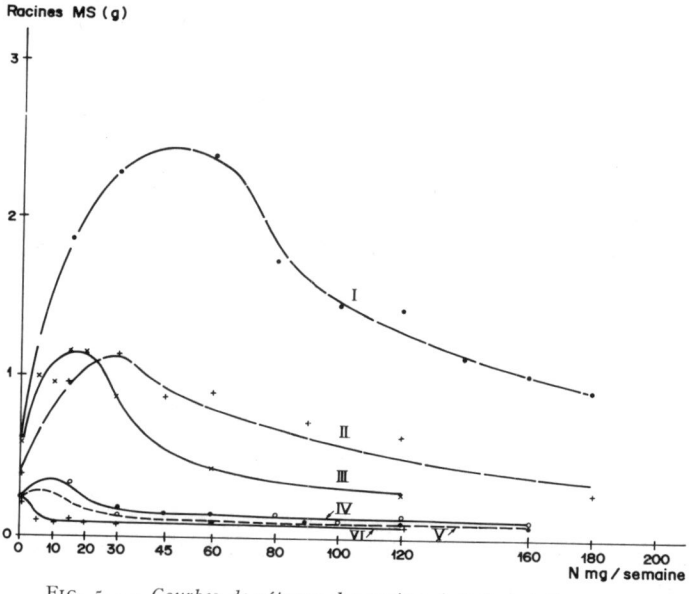


FIG. 5. — *Courbes de réponse des racines à l'alimentation azotée dans différentes conditions climatiques*

b) *Racines* (fig. 5).

Les six courbes obtenues montrent que, comme pour les parties aériennes, le maximum d'action de l'azote est sous la dépendance des variables climatiques, mais que ce maximum correspond toujours à une dose d'azote plus faible que pour les parties aériennes.

4. — *Effets des variables climatiques étudiées*

De manière à mettre en évidence les effets de la longueur du jour, de l'éclairement et de la thermopériode sur les parties aériennes et souterraines, seuls les poids maximum de celles-ci seront pris en considération. Le tableau 4 réunit les valeurs retenues.

TABLEAU 4

Rendements maximum des parties aériennes, poids maximum de racines, doses d'azote correspondantes en fonction des différents paramètres climatiques étudiés et de l'alimentation azotée

Éclairement	Thermopériode		Longueur du jour				Matière sèche (moyennes)
			8 h		16 h		
			matière sèche	dose N	matière sèche	dose N	
4 000 lux	20°-15°	parties aériennes	1,26	15	4,78	65	3,02
		racines	0,23	2	1,16	17	0,69
12 000 lux	20°-15°	parties aériennes	2,47	50	9,64	120	6,05
		racines	0,37	10	2,44	50	1,40
	30°-25°	parties aériennes	1,81	35	5,39	80	3,60
		racines	0,29	7	1,15	30	0,72
Moyenne		parties aériennes	1,84		6,60		
		racines	0,29		1,58		

a) *Influence de la longueur du jour.*

Quelles que soient les conditions de thermopériode et d'éclairement, l'augmentation de la longueur du jour se traduit par une élévation du rendement maximum des parties aériennes et des racines.

L'augmentation de la longueur du jour a un effet moyen plus important sur les

racines que sur les parties aériennes puisque le poids maximum de racines est multiplié par 5,44 alors que celui des parties aériennes l'est par 3,58.

L'allongement de la durée du jour a pour effet d'augmenter la dose d'azote responsable du maximum de poids, plus pour les racines que pour les parties aériennes, sans supprimer le décalage.

Donc l'effet dépressif de l'azote apparaît pour des doses d'autant plus élevées que le jour est plus long.

b) *Influence de l'éclairement.*

Quelle que soit la longueur du jour pour une thermopériode donnée, quand l'éclairement passe de 4000 à 12000 lux, le rendement maximum moyen des parties aériennes passe de 3,02 à 6,05 g ; celui des racines de 0,69 à 1,40 g.

L'augmentation de l'éclairement a le même effet sur les parties aériennes que sur les racines puisque les poids maximum moyens de parties aériennes et de racines sont multipliés par deux environ.

La dose d'azote responsable du maximum de poids des racines est plus augmentée que celle du maximum des parties aériennes mais le décalage existe encore.

L'augmentation de l'éclairement a pour effet de décaler vers les fortes doses d'azote les rendements maximum des parties aériennes et des racines.

c) *Influence de la thermopériode.*

Quelles que soient les conditions de durée de l'éclairement pour un éclairement donné, quand la thermopériode passe de 20°-15° à 30°-25°, le rendement maximum moyen des parties aériennes décroît de 6,05 à 3,60 g ; celui des racines, de 1,40 à 0,72 g. L'augmentation de la thermopériode a un effet un peu plus défavorable sur les racines que sur les parties aériennes puisque le poids des racines est multiplié par 0,50 et celui des parties aériennes par 0,59.

Dans l'intervalle étudié, l'augmentation de la thermopériode a pour conséquence de diminuer les doses d'azote responsables des poids maximum de racines et de parties aériennes et de maintenir le décalage.

En définitive, pour la variété de ray-grass utilisée, des trois variables climatiques étudiées, c'est la longueur du jour qui conditionne en premier lieu non seulement la croissance des parties aériennes mais aussi celle des racines. Quand ce facteur est limitant, l'éclairement et la thermopériode ont peu d'effet ; en photopériode favorable, les deux autres facteurs ont un effet comparable sur le poids des racines.

Quant aux doses d'azote provoquant le maximum de croissance, elles sont différentes selon que l'on considère les parties aériennes ou les racines. Elles sont toujours apparues plus faibles pour ces dernières. Ces doses sont d'autant plus élevées que les conditions climatiques sont plus favorables à la croissance.

CONCLUSIONS

Les déterminations de poids de parties aériennes et de racines effectuées sur des cultures de ray-grass hybride var. Io en vases de végétation ont donné les résultats suivants :

— les courbes de réponse à l'azote montrent une réaction des racines semblable à celle des parties aériennes mais décalée vers la zone de carence. Cependant, l'effet de l'azote est plus important sur les parties aériennes que sur les racines.

— les différents paramètres climatiques étudiés (longueur du jour, éclairement, thermopériode) interviennent de la façon suivante :

• ils jouent plus sur les racines que sur les parties aériennes, en particulier la longueur du jour ;

• ils conditionnent la quantité maximale de racines et de parties aériennes. Dans les conditions naturelles et plus encore dans les conditions de cultures sous serres, les effets d'un apport d'azote ne seront pas les mêmes suivant la période de l'année car l'un ou l'autre des paramètres climatiques pourra être limitant ;

— quelles que soient les conditions climatiques, la dose provoquant le maximum d'action de l'azote est plus basse pour les racines que pour les parties aériennes. Le maximum de croissance du feuillage correspond toujours à la zone de réduction du poids des racines. Suivant la dose apportée et les conditions de milieu, l'effet de l'azote sera stimulant ou dépressif pour les racines ; cela explique les opinions un peu contradictoires rencontrées dans la bibliographie et semble indiquer que la mesure du poids des racines ne soit pas le meilleur paramètre pour apprécier leur rôle dans la nutrition minérale azotée.

Une des conséquences du décalage entre les maximum des parties aériennes et des racines est la suivante : la fertilisation azotée des cultures de graminées pourrait être différente suivant leur emploi : plus faible dans le cas de certains engrais verts que dans celui de la production de fourrages.

Reçu pour publication en janvier 1975.

SUMMARY

THE COMPARATIVE ACTION OF NITROGEN SUPPLY ON THE GROWTH OF THE ROOT SYSTEM AND AERIAL PARTS OF PLANTS

The effect of nitrogen on the aerial parts and roots of Rye-grass is compared using plants in small pots on varying media (soil and solution), in natural and controlled climatic conditions.

The roots' reaction to nitrogen is similar to the reaction of the aerial parts, but their growth maximum is obtained with a smaller amount of nitrogen supply.

The various climatic parameters studied (day-length, light intensity, thermoperiod) come into play by conditioning maximum root quantity, acting to a greater degree on the roots than on the aerial parts and causing a variation in the amount of nitrogen responsible for the maximum in favour of the roots rather than the aerial parts.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER STICKSTOFFERNÄHRUNG AUF DAS WACHSTUM DES WURZELSYSTEMS UND DER OBERIRDISCHEN TEILE VON PFLANZEN

Der Vergleich der Wirkung von Stickstoff auf die oberirdischen Teile und auf die Wurzeln von Raigras wurde mit Hilfe von Kulturen in gelässen mit verschiedenen Substraten (Erde, Nährlösung) und in natürlichen und kontrollierten klimatischen Bedingungen durchgeführt.

Die Reaktion der Wurzeln auf den Stickstoff gleicht derjenigen der oberirdischen Teile, jedoch wird ihr Wachstumsmaximum schon bei geringerer Stickstoffgabe erreicht.

Die verschiedenen klimatischen Parameter, die untersucht wurden (Tageslänge, Beleuchtung, Thermoperiode) greifen ein, indem sie die maximale Wurzelmenge bestimmen. Sie wirken mehr auf die Wurzeln als auf die oberirdischen Teile, und bewirken, dass je verschieden grosse Stickstoffgaben für die maximale Wurzelmenge verantwortlich sind.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное действие азотного питания на рост корневой системы и надземной части растений.

Ф. ЛЕМЕР

Сравнение действия азота на надземные части и корневую систему рай-грасса было реализовано при помощи культур в вегетационных вазах на разных субстратах (почва и раствор), в природных, или контролируемых климатических условиях. Реакции корней на азот были теми-же что и реакции надземных частей, но максимальный рост корней достигался с более скудным азотным питанием.

Различные климатические параметры (длинна дня, интенсивность освещения, термо-периоды) об'уславливали также формирование максимального количества корней, и влияли значит больше на корни, чем на надземные части растений; нужно добавить что доза азота вызывавшая максимальный рост корней, менялась в больших размерах, чем доза необходимая для максимального роста надземной части.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANC-AICARD D., 1958. Influence de la nutrition azotée sur les propriétés d'échanges des racines. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2035-37.

BONZON B., PICARD D., 1969. Matériel et méthodes pour l'étude de la croissance et du développement en pleine terre des systèmes racinaires. *Cah. O. R. S. T. O. M.*, ser. Biol., **9**, 3-18.

BROUWER R., DE WITT C. T., 1969. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences, in *Root gowth*, Whittington WS ed., London Butterworths. 224-242.

BUI HUU TRI., 1969. *Dynamique de la granulation du sol sous prairie.* Thèse Paris, 67 p.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. Types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron.*, 121-133.

EATON S. W., 1949. Effects of P deficiency on growth and metabolism of sunflower. *Bot. Gaz.* **110**, 426-436.

ELLIS F. B., BARNES B. T., 1967. Estimation of the volume of root systems grown in solution culture. *Agric. Res. Council, Radiobiol. Lab. Annu. Rep.*, **18**, 20-22.

EVANS P. S., 1970. Root growth of *Lolium perenne* L. I. Effect of plant age, seed weight, and nutrient concentration on root weight, length and number of apices. *New. Zeal. J. Bot.*, **8**, (3), 344-356.

GAUTHERET R., 1961. Action de la lumière et de la température sur la néoformation de racines par les tissus de topinambour cultivés *in vitro*. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **252**, 2791.

GOEDEWAGEN M. A. S., 1937. The relative weight of shoot and root of different crops and its agricultural significance in relation to the amount of P added to the soil. *Soil Sci.*, **44**, 185-202.

GOETZ H., 1969. Root development and distribution in relation to soil physical conditions on four different native grassland sites fertilized with nitrogen at three different rates. *Canad. J. Plant Sci.*, **49**, 753-760.

GOODERHAM P. T., 1969. A simple method for the extraction and preservation of an undisturbed root system from a soil. *Plant and Soil*, **31** (1), 201-204.

GRAS R., 1961. Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. *Ann. agron.*, **12** (2), 207-248.

GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

HAAS H. J., 1958. Effects of fertilizers, age of stand and decomposition on weight of grass roots and alfalfa on soil N and C. *Agron. J.*, 501, 5-9.

HACKETT C., 1968. A study of the root system of barley. II. Relationships between root dimensions and nutrient uptake. *New Phytol.*, **68** (4), 1023-1030.

HARRIS H. C., 1968. Evaluation of root yields. *Soil crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **28**, 204-209.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol.* S. E. I. A., Paris.

HUGUET J. G., 1973. Nouvelle méthode d'étude de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée spirale. *Ann. agron.*, **24**, (6), 707-731.

KLEINENDORST A., BROUWER R., 1965. The effect of temperature on two different clones of perennial ryegrass. *Inst. biol. scheik. Onderz. Landbouw Gewassen, Meded.*, 280-295, 29-39.

LADONINA T. P., 1968. Influence des engrais minéraux sur la croissance des racines. *Cah. Engrais Composés*, **5**, 35.

LEMAIRE F., 1966. Observations sur l'enracinement du pommier dans un sol de limon de la région parisienne. *C. R. Acad. agric.*, **25** (5), 346-355.

LEMAIRE F., 1971. Effet des fractions extraites de la matière organique sur la physiologie des plantes. *Transactions of the intern. Symposium « Humus et Planta V »*, Prague 511-518.

LEMAIRE F., 1972. Étude des différents facteurs influençant la manifestation de l'effet spécifique de la matière organique sur les végétaux. *Ann. agron.*, **23** (1), 77-100.

MAERTENS C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Sci. Sol*, **2**, 31-41.

MAERTENS C., 1970. *Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées.* Thèse Toulouse, 162 p.

MOULINIER H., 1968. Relation entre la salinité réelle du sol et la croissance des racines. *C. R. 6e coll. Inst. intern. Potasse*, Florence, 256-258.

NEWMANN E. I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. applied Ecology*, **3** (1), 139-145.

NOSSBERGER J., FESSLER R., 1968. The effect of light intensity and nitrogen on dry matter production and nitrate content of italian ryegrass. *Rech. agron. Suisse*, **7** (3/4), 310-324.

PARIS H., 1969. Influence de l'acide phosphorique sur le développement du système radiculaire. *Trait d'Union agric.*, **33**, 6-10.

PÉRIGAUD S., 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18** (5), 485-506.

ROGERS W., 1932. Root studies. *J. Pomol. Hort.*, 10.

RUSSEL E. J., 1937. In *Soil conditions and plant growth.* 7e ed. Longmarns, Green and Co, London, New York and Toronto.

SCHUURMAN J. J., GOEDEWAGEN M. A. S., 1965. Methods for the examination of root systems and roots. *Centre Agric. Publ. et doc.*, 86 p.

STOIN M. R., 1968. *Effects of nitrogen nutrition and temperature on the growth, carbohydrate content, and nitrogen metabolism of cool-season grasses.* Thèse Michigan State university, 66 p.

TAYLOR H. M., 1970. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron. *Agron. J.*, **62** (6), 807-809.

THORUP R. M., 1969. Root development and phosphorus uptake by tomato plants under controlled soil moisture conditions. *Agron. J.*, **61** (5), 808-811.

TROUGHTON A., 1957. The underground organs of herbage grasses in *Bull. 44. Comm. Bur. Past. and field Crops.* C. A. B. England.

WIERSUM L. K., 1967. Root system development. In *Soil moisture and irrigation studies.* Proc. of a Panel, Vienna FAO/IAEA, 83-96.

Ann. agron., 1975, **26** (1), 75-99.

INCIDENCES DE QUELQUES TECHNIQUES CULTURALES SUR CERTAINES PROPRIÉTÉS DU SOL : RÉPERCUSSIONS SUR UNE CULTURE DE MAÏS

Ginette SIMON-SYLVESTRE et J. CHABANNES
avec la collaboration technique de Andrée BEAUMONT et J. DRIARD

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Une étude sur les incidences de diverses techniques culturales appliquées en grande culture sur maïs en sol de limon de plateaux à bonne productivité, a permis les observations suivantes notamment sur la micropopulation des sols :

— un *unique désherbage* à la simazine comparé à un désherbage manuel agit temporairement sur la microflore du sol sans toutefois affecter la croissance, le développement ni la composition minérale du maïs ;

— une *couverture plastique noire*, en modifiant les conditions de milieu (d'abord les conditions physiques, puis biologiques et enfin chimiques) exerce une action favorable très marquée sur la culture (croissance, développement, composition). Cependant, des remarques sont à formuler pour la culture suivante notamment au point de vue de la fumure et de la nématofaune du sol ;

— un *conditionneur de sol noirci*, sans effet sur les cycles biologiques des sols, agit par voie physique et conduit à une augmentation significative du rendement du maïs.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, de nouvelles techniques culturales ont pris de l'extension en agriculture. Il en est ainsi du couvert plastique en cultures maraîchère et ornementale, en viticulture et même en grande culture dans des cas bien précis : culture du maïs dans des régions où le climat ne permettait pas son développement complet (ADAMS, 1967, 1970) et dans des terres crayeuses signalées parfois pour un démarrage difficile de la plante (BALLIF et DUTIL, 1971, 1973). C'est aussi le cas des conditionneurs superficiels de sol, à base de particules plastiques, dont l'utilisation

plus récente semble gagner d'autres domaines que ceux initialement envisagés par leurs fabricants, notamment celui de la culture betteravière en sols battants (LOISEL, 1971 ; RÉMY, 1972). Dans le même ordre d'idées, il faut mentionner le mulch bitumineux que les maraîchers ont maintenant tendance à employer en plein champ (VOGEL et SCHRODER, 1973), alors qu'à l'origine, il était réservé à l'arboriculture fruitière, à la culture de la betterave ainsi qu'à celle du maïs dans les terrains utilisés pour la sélection. Pour chacune de ces techniques culturales qui entraînent des changements dans les différents facteurs écologiques, les recherches sont encore assez fragmentaires ; cependant, la couverture plastique a donné lieu à des travaux plus nombreux et plus diversifiés, mais qui méritent d'être approfondis encore sur certains points.

Notre étude, poursuivie deux années consécutives à partir d'une expérimentation au champ, porte sur l'utilisation du couvert plastique et sur celle du conditionneur de sol appliquées à la culture du maïs. Le choix de cette culture nous a permis d'élargir l'essai et d'inclure un troisième traitement : le désherbage à la simazine, qui amène lui aussi une altération du milieu.

Le but de ce travail consiste à préciser les incidences de ces trois traitements sur la micropopulation des sols dont l'équilibre risque d'être modifié à la suite des variations physiques et chimiques qu'ils entraînent. Nous nous sommes attachés notamment à étudier l'activité de microrganismes responsables des cycles saisonniers de l'azote et du soufre. Parallèlement, il nous a paru utile de suivre le comportement du végétal qui traduit la résultante des divers processus modifiant les conditions de milieu.

CONDITIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

1. — *Choix des traitements étudiés*

Le premier essai (1971) comprend :

— des parcelles désherbées à la main (prises comme témoin),
— des parcelles traitées à la simazine (2,5 kg de matière active par hectare, trois semaines avant le semis),
— des parcelles recouvertes entièrement de plastique (150 microns d'épaisseur), choisi noir pour éviter l'apparition des adventices.

A la suite des résultats, quasi identiques, acquis dans cette expérience pour les deux premières techniques de désherbage, nous avons appliqué la simazine en 1972 sur l'ensemble du dispositif du deuxième essai (même dose qu'en 1971, quatre semaines avant le semis), si bien que les parcelles témoin étaient légèrement différentes de celles du premier essai. Trois traitements ont alors été retenus :

— Témoin ;
— Conditionneur de sol (1) enrichi d'un pigment noir (2) pour observer éventuellement un effet thermique ;
— Couverture plastique noire.

2. — *Conditions pédo-climatiques*

Les deux expériences ont été réalisées sur deux terrains contigus de la ferme expérimentale de La Minière, près de Versailles. Le sol est un limon de plateaux légèrement acide, profond et

(1) Suspension de particules plastiques dispersées.
(2) Vraisemblablement du noir animal.

assez battant (17,0 p. 100 d'argile, 27,3 p. 100 de limon et 48,0 p. 100 de sables très fins), pauvre en matières organiques (1,49 p. 100) et correctement pourvu en éléments fertilisants.

L'implantation des deux essais a eu lieu dans des conditions nettement différentes. L'année 1971 a été caractérisée par un hiver et un printemps secs. Ce n'est qu'après une pluie orageuse, fin mai, qui a permis de constituer une certaine réserve d'eau indispensable aux besoins du maïs, qu'il a été possible de mettre en place le plastique : le sol était déjà réchauffé ; la germination s'en est trouvée fortement activée. Par contre, en 1972, le printemps a été très humide et le sol était froid lors du semis. D'autre part, les diagrammes de déficit cumulé se présentent différemment pour les deux années considérées. En 1971, le déficit cumulé, à tendance ascendante, s'est accru de mai à novembre de plus de 350 mm (fig. 1). En effet, seuls sont venus interrompre un été et un

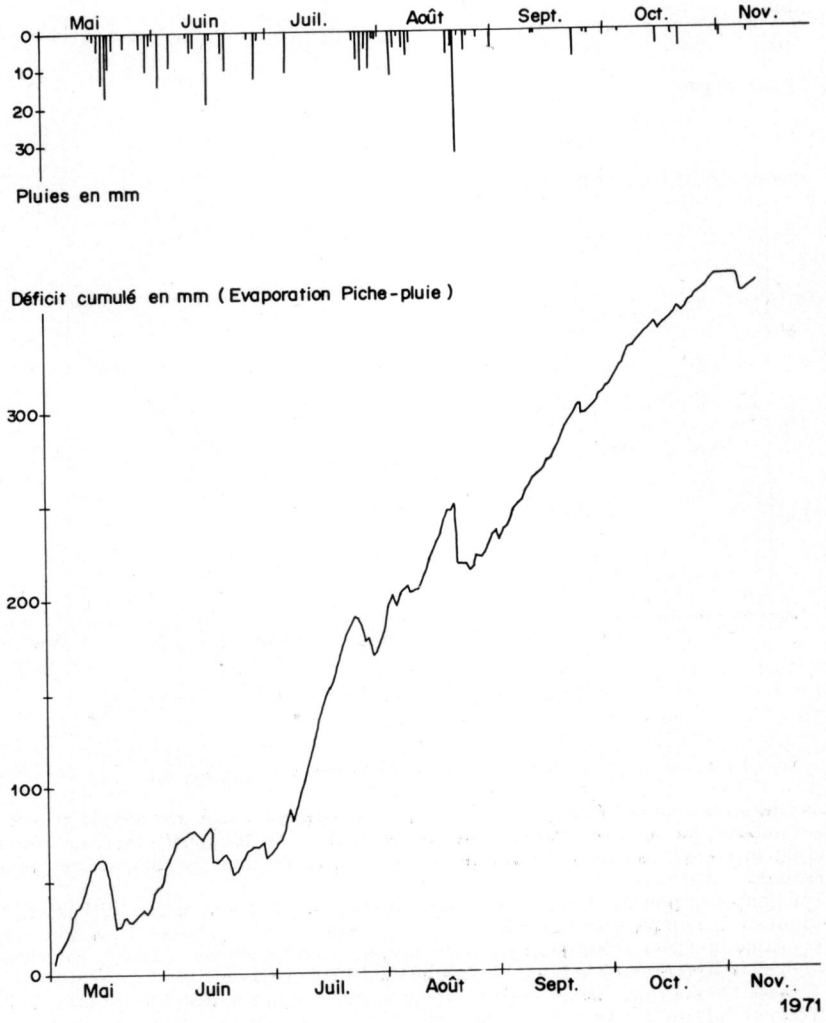


FIG. 1. — *Déficit théorique en 1971*

début d'automne chauds, quelques orages dont un très violent, le 24 juillet. En dehors de cet accident, l'année 1971 présente toutes les caractéristiques d'une année favorable à la culture du maïs. Il n'en est pas de même pour 1972 dont le diagramme du déficit cumulé (fig. 2) ne comporte

pas de phase ascendante mais des oscillations de faible amplitude (± 50 mm), traduisant à la fois des évaporations réduites et une pluviométrie faible tout au long du cycle végétatif du maïs, avec, comme conséquence, un effet visuel très atténué de cette couverture plastique sur la culture.

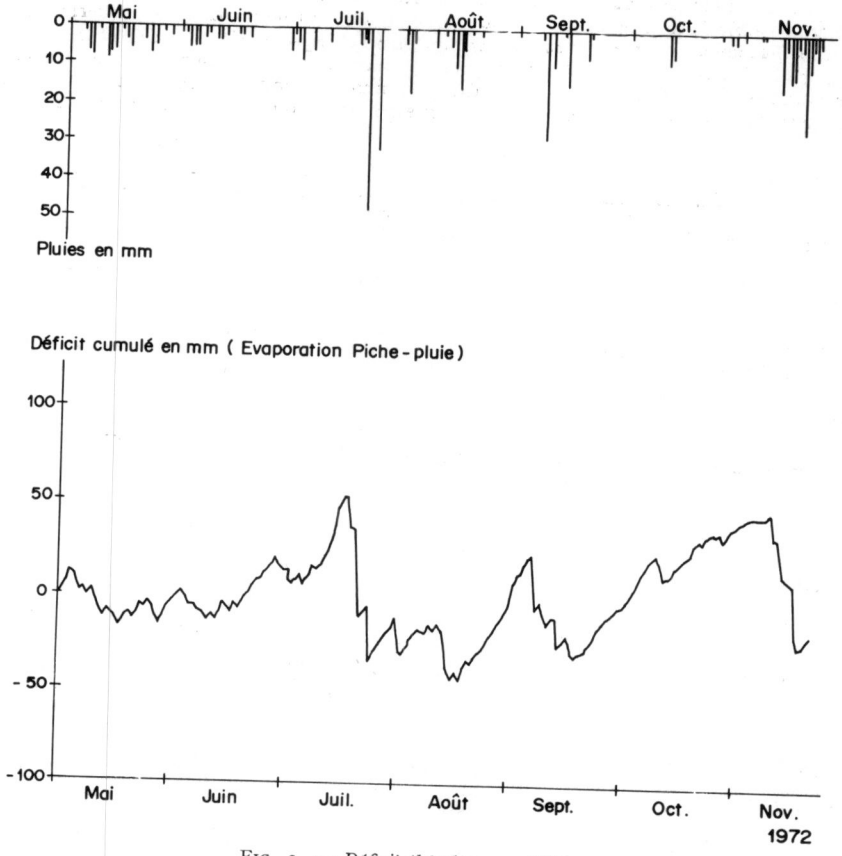


FIG. 2. — *Déficit théorique en 1972*

3. — *Dispositif expérimental*

Dans chacun des essais, le dispositif expérimental comprend douze parcelles de 3,30 × 10 m, en bandes successives (quatre blocs) recevant une fumure de fond uniforme. La couverture plastique est enterrée à la bèche, en bordure de chaque parcelle, dans un sillon d'une profondeur de 25 centimètres environ.

Avant l'implantation du premier essai, sont appliqués, par hectare, 120 kg d'azote, d'acide phosphorique et de potasse sous forme d'un engrais complet 17/17/17. Nous avons opté volontairement pour une fumure un peu faible en azote, afin de mieux différencier les effets éventuels du plastique et de la simazine sur le cycle biologique de cet élément.

La fumure minérale du second essai ne comprend que vingt unités d'azote (ammonitrate), car le précédent cultural comportait une féverole et un blé retourné au début du printemps pour les besoins de l'essai et déjà fertilisé.

La plante expérimentée est un maïs $F_7 \times Ep_1$ [1], choisi pour son comportement très homogène en végétation, et semé à la main à la densité de 83 300 pieds/hectare. Dans le cas de la couverture plastique, des perforations sont effectuées dans la ligne, tous les quinze centimètres. La

[1] Hybride simple, géniteur d'*INRA 258*.

densité en fin de culture est demeurée identique puisque le pourcentage de germination de cet hybride est très élevé (98 p. 100) et que, par précaution, trois grains ont été semés à chaque perforation, un seul pied étant finalement conservé.

4. — *Contrôles effectués* (techniques de prélèvements et mesures)

a) *Sols.*

Chaque parcelle comprend quatre rangs et seuls les deux rangs du milieu sont retenus pour cette étude. L'entre rang correspondant, jamais piétiné, est utilisé pour les prélèvements mensuels de sols, entre 0-5 et 5-20 cm (8 sondages par parcelle). Pour la couverture, les trous laissés par la sonde sont aussitôt obturés avec du film plastique de même couleur.

Les recherches microbiologiques et les dosages d'azote minéral sont réalisés sur des échantillons frais. Les autres déterminations sont effectuées sur le même échantillon après séchage à l'air. Seule la porosité a été mesurée à la fois sur des mottes sèches et sur des mottes humides.

b) *Plantes.*

Deux stades caractéristiques ont été choisis pour le prélèvement des plantes : l'apparition de la fleur mâle — afin d'apprécier les conditions d'alimentation de la plante d'après la composition minérale de la sixième feuille — et la récolte.

INCIDENCES SUR LA MICROPOPULATION DES SOLS ET SUR L'ACTIVITÉ DE CERTAINS MICRORGANISMES

Généralement, dans un sol qui n'est soumis à aucune influence extérieure, les grands groupes de microrganismes ainsi que la microfaune sont en équilibre dynamique, mais cet équilibre reste précaire et de petites variations des conditions locales risquent de le rompre et d'entraîner un accroissement d'activité chez un ou plusieurs de ces groupes, et une diminution chez d'autres. C'est pourquoi nous avons entrepris quelques recherches à ce sujet ; des modifications de microflore sont en effet susceptibles d'apparaître à la suite de la pulvérisation sur le sol d'un produit chimique, telle la simazine, ou avec des altérations des conditions physiques, comme celles de température et d'humidité, provoquées par la pose d'une couverture plastique ou par l'emploi de ce désherbant.

Nous nous sommes limités à l'étude de la microflore totale et à celle de quelques groupes microbiens dont l'activité intéresse particulièrement l'agronome. Nous avons adopté les techniques courantes de POCHON et TARDIEUX (1962). Elles permettent tantôt un dénombrement des genres (1) (microflore totale, champignons, bactéries cellulolytiques aérobies, bactéries fixatrices d'azote), tantôt une mesure d'activité de ceux-ci d'après l'importance du produit final formé (ammonification, nitrification, minéralisation du soufre organique).

La nématofaune a été étudiée à Antibes par M. SCOTTO LA MASSESE à la Station de Recherches sur les Nématodes.

1. — *Microflore totale*

L'évaluation de la microflore totale fournit les premiers renseignements sur les modifications possibles de l'équilibre biologique des sols sous l'influence des diffé-

(1) Ces dénombrements ont été effectués seulement dans le premier essai.

rentes techniques. Il est nécessaire de la compléter par une étude de divers groupes de microrganismes afin de préciser ceux qui sont affectés ainsi que le sens des variations.

a) *Simazine* (tabl. 1).

Une pulvérisation de simazine entraîne une augmentation des microrganismes du sol. L'effet est surtout net dans les cinq centimètres superficiels puisqu'un doublement de leur nombre est constaté 50 et 113 jours après le traitement. Cet effet a ensuite tendance à s'atténuer avec le temps.

TABLEAU 1

Influence d'un traitement à la simazine sur la microflore totale du sol
(Indices de comparaison par rapport au témoin pris égal à 100)

Profondeur du prélèvement de sol	20 jours après le traitement	50 jours	113 jours	190 jours
de 0 à 5 cm	83	200	216,4	110,6
de 5 à 20 cm	98,4	135,7	120,6	139,2

b) *Couverture plastique* (tabl. 2).

En surface, sous le plastique, la population microbienne s'est fortement multipliée. L'indice de comparaison atteint 400 un mois après la mise en place de la couverture. Les numérations réalisées en-dessous de 5 cm fournissent des chiffres assez fluctuants.

TABLEAU 2

Influence d'une couverture plastique noire sur la microflore totale du sol
(Indices de comparaison par rapport au témoin pris égal à 100)

Profondeur du prélèvement de sol	30 jours après la pose	93 jours	170 jours
de 0 à 5 cm	400*	219,1	363,6
de 5 à 20 cm	57,1	107,2	59,0

* : Différence significative à $P \leqslant 0{,}05$.

Ces deux techniques culturales conduisent vraisemblablement pour des raisons différentes, à des résultats de même sens : une exaltation, plus ou moins importante, de la vie microbienne dans la couche superficielle du sol. Il est possible qu'une pulvérisation de simazine en agissant par voies chimique et physique (lissage du sol)

exerce un effet stimulant sur divers microrganismes, cause la mort de certains autres et favorise alors, en diminuant la compétition, le développement d'autres groupes microbiens. Quant aux conditions favorables de température et d'humidité créées par la pose de la couverture plastique, elles sont responsables d'une augmentation de la multiplication microbienne, comme c'est souvent le cas quand le sol bénéficie de conditions améliorées.

2. — *Champignons du sol*

Il nous a paru important de rechercher les répercussions éventuelles d'un désherbage à la simazine et d'un couvert plastique sur les champignons du sol, étant donné leur rôle primordial dans la décomposition des matières organiques carbonées ainsi que dans les processus d'humification.

a) *Simazine* (tabl. 3).

A l'exception d'une légère exaltation dès le départ de l'expérience, le traitement du sol à la simazine provoque dans la couche superficielle (0-5 cm) une diminution des champignons du sol, diminution qui a d'ailleurs tendance à s'estomper au cours du temps, vraisemblablement à mesure que décroît l'efficacité du produit.

TABLEAU 3

Influence d'un traitement à la simazine sur les champignons de la surface du sol
(Indices de comparaison par rapport au témoin pris égal à 100)

Profondeur du prélèvement	20 jours après le traitement	50 jours	113 jours	190 jours
de 0 à 5 cm	120,8	56,5*	65,5*	82,2*

* : Différences significatives à $P \leqslant 0{,}05$.

TABLEAU 4

Influence d'une couverture plastique noire sur les champignons de la surface du sol
(Indices de comparaison par rapport au témoin pris égal à 100)

Profondeur du prélèvement	30 jours après la mise en place de la couverture plastique	93 jours	170 jours
de 0 à 5 cm	130,2	77*	35,5*

* : Différences significatives à $P \leqslant 0{,}05$.

b) *Couverture plastique* (tabl. 4).

Le dénombrement des champignons dans les prélèvements effectués sous le plastique, dans la couche 0-5 cm, fournit des résultats semblables à ceux obtenus avec la simazine.

Le comportement analogue de la microflore fongique vis-à-vis de la simazine et du couvert plastique s'expliquerait un peu différemment : la simazine, en plus d'un effet physique, agit en tant que produit chimique auquel les champignons se révèlent sensibles ; la couverture plastique du fait de sa nature physique et de son mode d'implantation, limite les échanges gazeux du sol avec l'atmosphère ; or, les champignons sont des organismes essentiellement aérobies dont le nombre global diminue généralement en même temps que l'aération : l'effet augmente d'ailleurs avec la durée de l'expérience. Il aurait été intéressant de compléter cette recherche par une détermination des différentes espèces fongiques affectées par ces deux techniques. Il faut ajouter que dans le cas du désherbage chimique, l'effet défavorable est fugace et ne devrait pas modifier l'évolution des matières organiques du sol.

3. — *Bactéries cellulolytiques aérobies*

La cellulolyse, tout au moins d'après le dénombrement des bactéries cellulolytiques aérobies, ne paraît perturbée ni par un désherbage chimique, ni par la pose d'une couverture plastique.

4. — *Cycle de l'azote*

Les modifications physico-chimiques provoquées par ces deux techniques culturales sont susceptibles d'affecter les différents maillons du cycle biologique de l'azote et de conduire à des conséquences agronomiques importantes.

a) *Fixation de l'azote atmosphérique.*

La présence de simazine n'a pas modifié la fixation d'azote atmosphérique telle que la méthode de Winogradsky (silicogel) permet de le mettre en évidence. Au contraire, pour la couverture plastique, le nombre de bactéries fixatrices s'accroît légèrement sur toute la hauteur du prélèvement (tabl. 5). Étant donné que seul un

TABLEAU 5

Influence d'une couverture plastique sur le développement des bactéries fixatrices d'azote
(Indices de comparaison par rapport au témoin pris égal à 100)

Profondeur du prélèvement	30 jours après la pose du plastique	93 jours	170 jours
de 0 à 5 cm	145	281	200
de 5 à 20 cm		160,2*	173,6

* : Différence significative à $P \leqslant 0{,}05$.

dénombrement a été réalisé, il est possible que cette exaltation apparente soit due à la présence concomittante, dans le sol, de bactéries fixatrices aérobies et anaérobies, les unes et les autres non strictes. A ce sujet, POCHON et TCHAN (1948), et POCHON et DE BARJAC (1958) signalent que les « Clostridium sont des anaérobies relativement tolérants à l'oxygène » et que les « Azotobacters semblent supporter des tensions d'oxygène du même ordre que les souches les moins anaérobies de Clostridium. »

b) *Minéralisation de l'azote* (ammonification et nitrification).

— *Simazine.*

D'après des expériences réalisées *in vitro* avec la terre prélevée dans les parcelles de l'essai, l'activité des bactéries ammonifiantes, nitreuses et nitriques, n'est pas diminuée par l'emploi de la simazine. Au contraire, le diagramme de la minéralisation de l'azote (azote ammoniacal + azote nitrique), représentant les résultats analytiques correspondant à la couche 0-20 cm, est légèrement translaté au-dessus de celui obtenu pour les parcelles non traitées ; cependant, les différences sont parfois à la limite de la signification sauf en fin du cycle végétatif (fig. 3). Ce résultat pourrait s'expliquer par une diminution de l'infiltration des pluies dans les parcelles désherbées chimiquement, causée par la formation d'une croûte en surface. En effet, l'humidité de la terre des parcelles traitées à la simazine demeure toujours significativement plus faible (de 1 à 4 p. 100) que celle de la terre des parcelles désherbées manuellement.

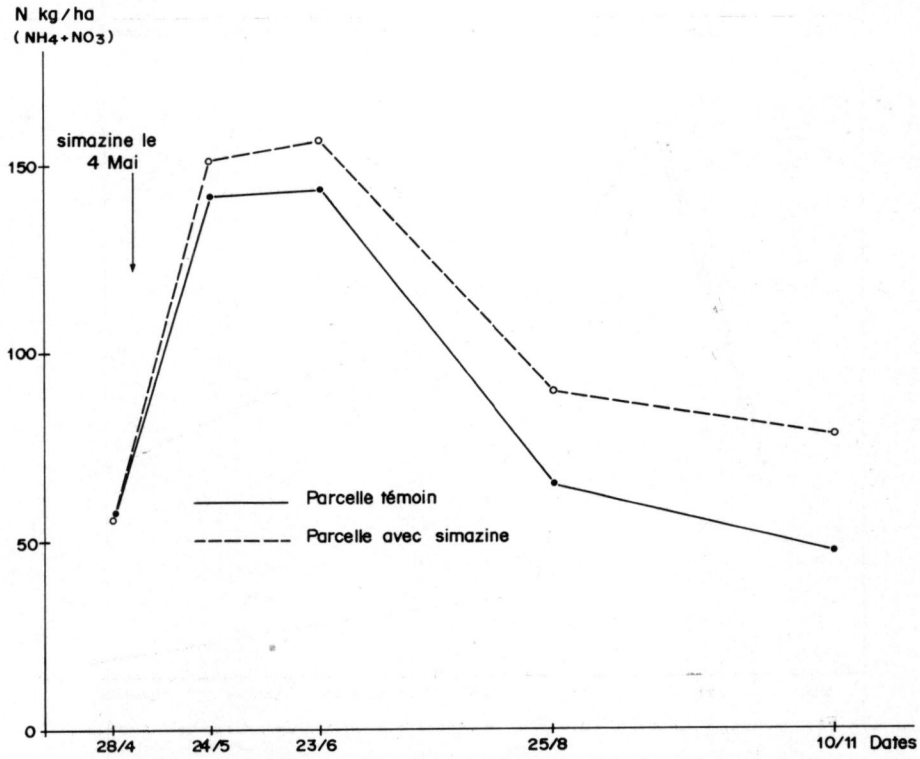


FIG. 3. — *Influence d'un traitement à la simazine sur l'azote minéral du sol* (couches 0-5 cm et 5-20 cm)

— *Couverture plastique.*

Les dosages d'azote minéral dans les divers échantillons de sols (1) révèlent une action positive du plastique sur la minéralistaion de l'azote. Déjà perceptible en 1971, cet effet apparaît plus nettement dans le second essai et se manifeste particulièrement dans les cinq premiers centimètres (fig. 4 et 5). Or ces teneurs en azote minéral ne

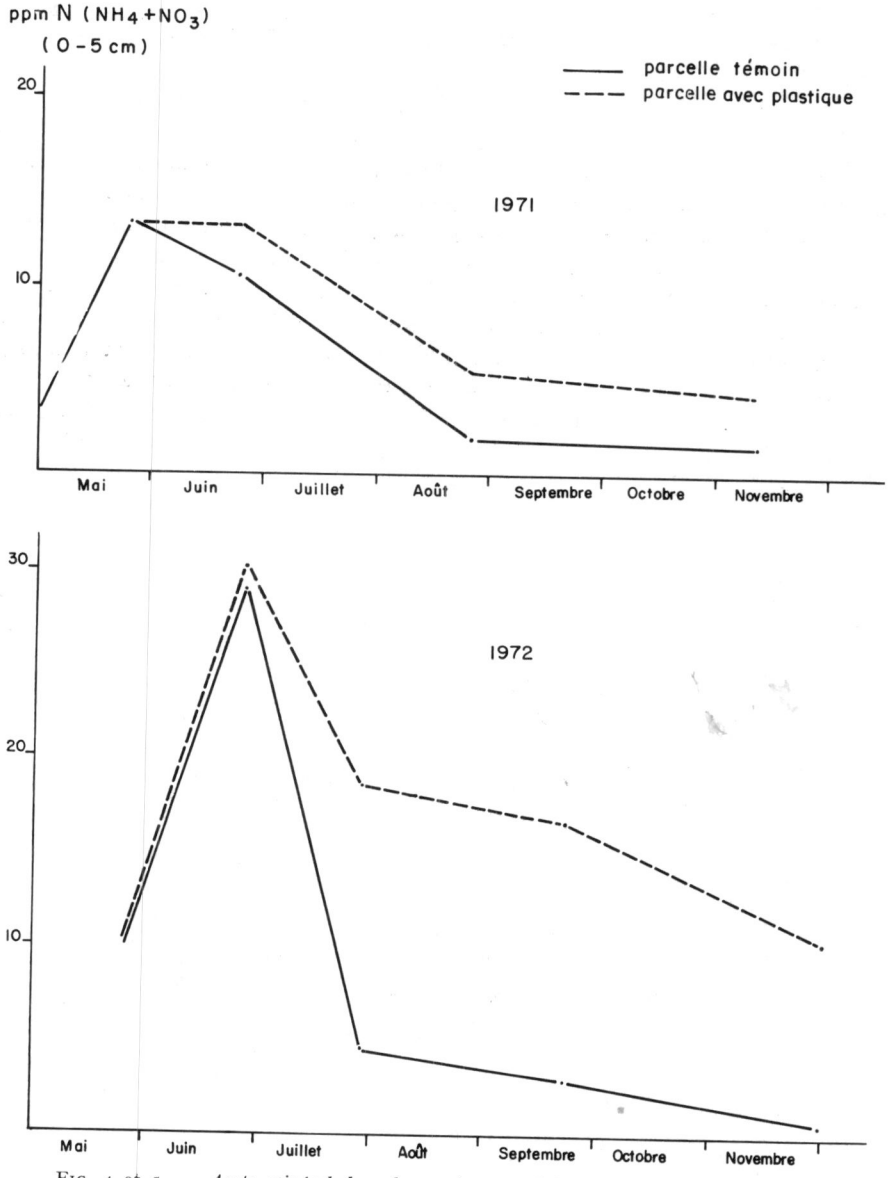


FIG. 4 et 5. — *Azote minéral dans la couche superficielle du sol en 1971 et 1972*

(1) Des difficultés présentées par la réalisation de conditions identiques à celles de l'essai au champ n'ont pas permis d'entreprendre une étude *in vitro*.

fournissent que le bilan de divers processus simultanés : minéralisation de l'azote organique, absorption d'azote minéral par les plantes et les microrganismes ; l'éventualité d'un lessivage ou de pertes d'azote gazeux pendant la culture est vraisemblablement à exclure. Ce bilan favorable, alors que les prélèvements d'azote par les plantes sont intensifiés, témoigne en faveur d'une minéralisation amplifiée sous le plastique.

— *Conditionneur de sol.*

L'emploi de ce produit n'a pas modifié la minéralisation de l'azote du sol.

5. — *Cycle du soufre*

Comme l'azote, le soufre est soumis dans la nature à de nombreuses transformations où sont impliqués le plus souvent des agents biologiques, notamment des microorganismes, dont l'activité varie en fonction des conditions pédoclimatiques.

D'une manière générale, dans les deux essais, le soufre minéral présente au cours de l'année des fluctuations très faibles et les diagrammes correspondant aux différents traitements sont assez voisins les uns des autres.

Il est intéressant toutefois de noter la constance de la teneur en soufre minéral de la couche superficielle (0-5 cm) sous la couverture plastique, en particulier en 1971 (fig. 6), alors que la teneur des parcelles « témoin » présente quelques variations significatives. Ce fait est vraisemblablement en rapport avec une diminution des oscillations de l'humidité du sol sous le plastique.

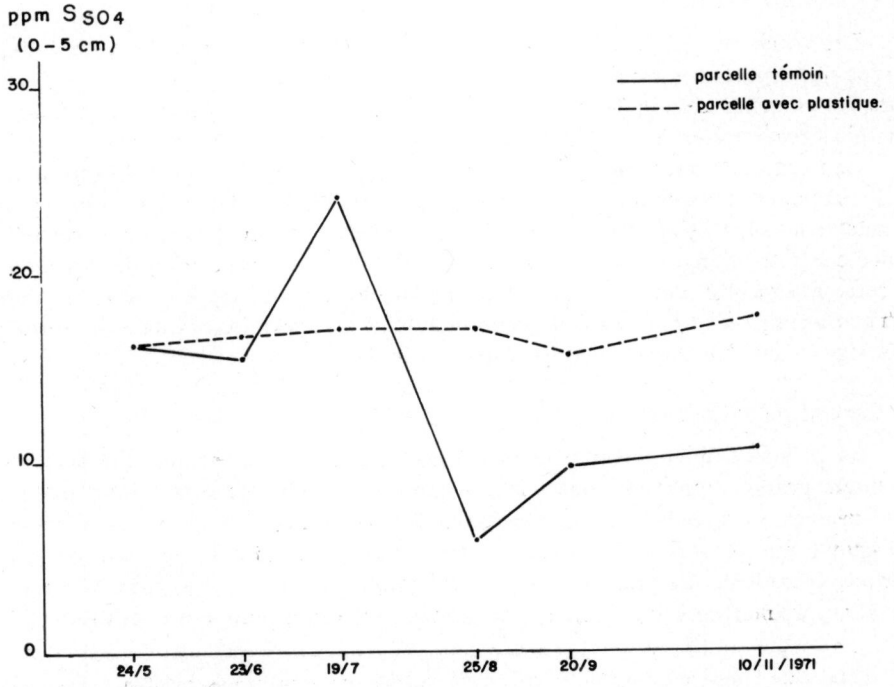


FIG. 6. — *Soufre minéral dans la couche superficielle du sol*

6. — *Nématodes*

Des analyses nématologiques ont été réalisées sur des échantillons de terre prélevés dans le premier essai un mois avant la récolte du maïs.

Les effets des divers traitements sont principalement marqués sur la nématofaune de l'horizon superficiel. En dessous de 5 cm, l'influence est beaucoup moins nette.

Alors que le traitement à la simazine entraîne une diminution de moitié des *Tylenchidae* et principalement des *Tylenchus*, des *Tylenchorhynchus* et des *Paratylenchus*, la couverture plastique amène un enrichissement du simple au double des *Paratylenchus* et des *Pratylenchus minyus* ainsi que des *Meloïdogyne naasi* dont le nombre est sextuplé. Toutefois, ces modifications d'équilibre n'ont pas de conséquences pour le maïs, car aucune des espèces concernées n'est aggressive pour cette plante.

INCIDENCES SUR LA CULTURE DU MAÏS

1. — *Observations phénologiques*

a) *Simazine.*

Le maïs désherbé chimiquement apparaît toujours identique à celui des parcelles désherbées manuellement, de la levée à la récolte.

b) *Couverture plastique.*

Les conditions climatiques de l'année influencent nettement les intervalles de temps qui séparent le semis, soit du stade fleur mâle, soit de la maturité, aussi bien dans les parcelles témoin (60 et 162 jours en 1971 ; 72 et 182 (1) en 1972) que dans les parcelles recouvertes de plastique (respectivement 57 et 146 ; 67 et 182 (1)).

Le plastique noir, dont l'effet thermique a déjà été signalé, active la germination, et l'écart avec le « témoin » s'accroît si cette période est froide (deux jours en 1971 et quatre en 1972). Ensuite, en année chaude et sèche comme l'a été 1971, cette différence continue d'augmenter pour atteindre neuf jours à l'apparition de la fleur mâle et seize à la récolte. Par contre, en année froide et humide, avec une faible insolation, l'effet thermique est peu marqué, et cette avance à la germination ne s'accentue que très légèrement à la sortie de la fleur mâle (5 jours).

c) *Conditionneur de sol.*

La présence du conditionneur de sol noirci entraîne un certain effet thermique, de moins grande amplitude toutefois que dans le cas de la couverture plastique noire. Des relevés journaliers de température, à 5 cm dans le sol sous conditionneur, indiquent une élévation de la température maxima d'autant plus sensible que la période considérée est plus chaude, et atteignant parfois 2 ou 3 degrés. Ce résultat est à rapprocher de ceux signalés par LEHFELDT (1972) pour des conditionneurs de

(1) La date tardive de la récolte en 1972 a été imposée par les mauvaises conditions climatiques de l'année.

sol teintés. Ce traitement conduit également à une légère tendance à l'amélioration de la stabilité structurale sans modification de la porosité. L'ensemble de ces actions entraîne une amélioration de la germination avec un moindre étalement de la période de levée (fig. 7). Par la suite, pendant la première partie du cycle végétatif, on observe un décalage d'une feuille en faveur de ce traitement, seulement aux stades 3, 5 et 8 feuilles. A la récolte, la teneur en eau des grains dénote encore une légère avance.

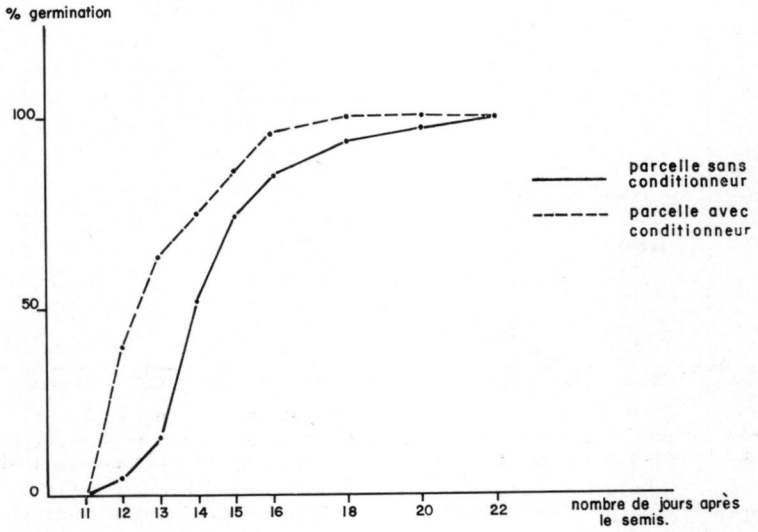


FIG. 7. — *Influence du conditionneur de sol sur la germination du maïs*

2. — *Observations pathologiques*

Les conditions hygrométriques de l'année 1972 ont vraisemblablement favorisé le développement de certaines maladies cryptogamiques dont celui du charbon (*Ustilago maydis*). Dans notre essai, l'attaque a été doublée dans la partie médiane moins aérée, et principalement, dans les parcelles sous couverture plastique où elle atteint 7 p. 100 des épis.

3. — *Production végétale : résultats métrologiques*

a) *Au cours du cycle végétatif.*

— *Simazine et couverture plastique.*

De l'ensemble des résultats métrologiques (1971) qui figurent sur la figure 8, il ressort une bonne similitude pour les deux maïs désherbés différemment. Sous le couvert plastique, le maïs, outre une coloration vert nettement plus foncé, présente toujours une croissance supérieure. Les diamètres des tiges sont accrus, les feuilles plus larges et des répercussions apparaissent sur la production de matière sèche dès la sortie de la fleur mâle (indice de comparaison 132,5 par rapport au témoin pris égal à 100).

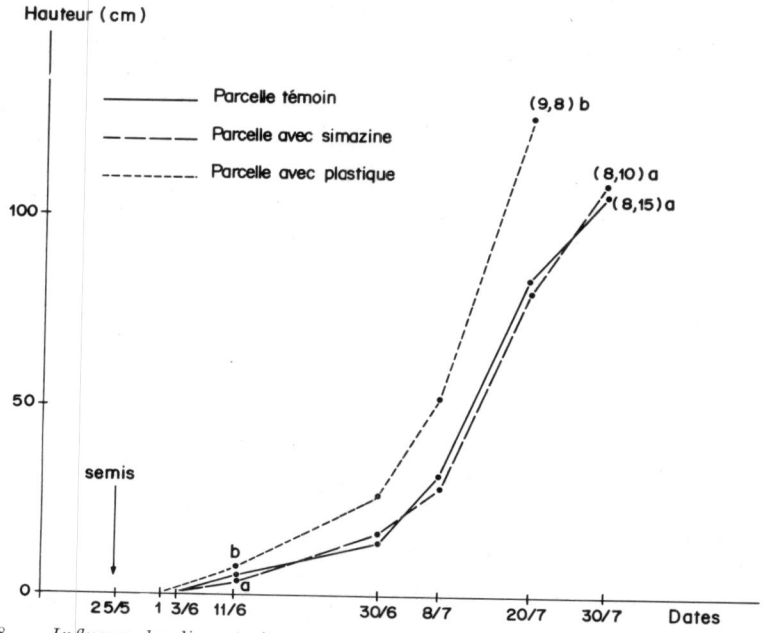


FIG. 8. — *Influence des divers traitements sur la croissance du maïs jusqu'au stade fleur mâle*
(Les chiffres entre parenthèses indiquent la circonférence de la tige, en cm, au-dessus du 1er entre-nœud ; ils sont suivis de lettres différentes, quand l'écart est significatif)

Dans le second essai, sous plastique, nous retrouvons la même intensité de coloration du feuillage, un indice de comparaison voisin pour la hauteur, et un effet moins marqué, bien que significatif ou à la limite de la signification, respectivement sur le diamètre des tiges et sur la production de matière sèche.

— *Conditionneur de sol.*

Alors que, souvent, le conditionneur de sol semble occuper une position intermédiaire entre le « témoin » et la couverture plastique, la discussion statistique pour les diverses mensurations et pesées ne fait pas apparaître de différence significative avec celles du maïs des parcelles « témoin ».

b) *A la récolte.*

La date de récolte du maïs est habituellement choisie en fonction du taux d'humidité du grain. De ce fait, pour le premier essai, nous avons eu deux dates : le grain de maïs récolté le 3 novembre dans les parcelles désherbées manuellement ou chimiquement présentait le même taux d'humidité que celui du maïs des parcelles sous plastique le 18 octobre, accusant ainsi un retard de maturité de seize jours (tabl. 6). En 1972, par contre, en raison d'un allongement anormal du cycle végétatif du maïs et de l'époque avancée de l'année, nous n'avons procédé qu'à une seule récolte, le 27 novembre, mais il subsistait une différence significative dans les humidités des grains (tabl. 6). Il faut remarquer, à ce sujet, l'effet favorable du conditionneur.

— *Simazine.*

Le désherbage chimique à la simazine n'amène pas de modification aussi bien dans les organes végétatifs que dans le grain (tabl. 7).

TABLEAU 6

Pourcentage d'humidité dans les grains de maïs en 1971 et 1972

	Témoin	Simazine	Couverture plastique
Année 1971			
18 octobre	40,40^a	40,35^a	37,30^b
3 novembre	37,50^a	37,45^a	34,90^b

	Témoin	Conditionneur de sol	Couverture plastique
Année 1972			
27 novembre	49,20^a	46,55^b	45,55^b

Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes ($P \leqslant 0,05$).

TABLEAU 7

Rendement du maïs en matière sèche à 105° (kg/ha)
(Indices de comparaison entre parenthèses)

	1971			1972		
	Témoin	Simazine	Couverture plastique	Témoin	Conditionneur de sol	Couverture plastique
Racines	978^a (100)	1 008^a (103)	1 761^b (180)	833^a (100)	864^{ab} (103,7)	913^b (109,6)
Tiges et feuilles	3 653^a (100)	3 560^a (97,5)	6 217^b (170,2)	3 222^a (100)	3 305^a (102,5)	3 727^b (115,6)
Grains (2)	6 726^a (100)	6 741^a (100,2)	8 983^b (133,5)	5 362^a (100)	5 898^b (1) (110)	6 515^c (121,4)
Rachis	1 098^a (100)	1 096^a (99,8)	1 450^b (132)	937^a (100)	989^b (105,5)	1 113^c (118,7)
Spathes	953^a (100)	912^a (95,7)	1 472^b (154)	1 263^a (100)	1 289^a (102,0)	1 489^b (117,8)
TOTAL	13 408 (100)	13 317 (99,3)	19 883 (148,2)	11 617 (100)	12 345 (107,4)	13 757 (118,4)

Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes ($P \leqslant 0,05$).
(1) $P \leqslant 0,10$.
(2) Les coefficients de variation sont de 5,6 en 1971 et de 7,7 en 1972.

— *Couverture plastique.*

La couverture plastique conduit à un accroissement de matière sèche des diverses parties du végétal, variable selon les années (tabl. 7). En 1971, ce sont les tiges et les feuilles ainsi que les racines qui ont été les plus affectées par ce traitement. L'effet a été moindre sur les grains bien que le rendement se soit tout de même accru de 33 p. 100, alors que l'année suivante, il n'était enregistré qu'une augmentation de matière sèche d'environ 20 p. 100 sur les différentes parties du végétal, à l'exception des racines. Pour le premier essai, l'écart avec le témoin aurait peut-être été un peu plus faible si la fumure azotée avait été plus élevée.

Un examen plus approfondi des diverses parties du végétal apporte un complément d'information :

— avec le couvert plastique, le nombre de *grosses racines* n'est pas modifié ; par contre, la largeur du *chevelu radiculaire* est toujours accrue, la longueur également en année favorable (tabl. 8), si bien que le volume de terre exploré par les racines est

TABLEAU 8

Indices de comparaison pour les divers traitements en 1971 et 1972 (racines)

	Nombre de grosses racines	Longueur du chevelu radiculaire	Largeur du chevelu radiculaire
Année 1971			
Témoin	100^a	100^a	100^a
Simazine	$96{,}8^a$	$105{,}4^{ab}$	$101{,}8^a$
Couverture plastique ..	$98{,}8^a$	$117{,}4^b$	$124{,}9^b$
Année 1972			
Témoin	100^a	100^a	100^a
Conditionneur de sol ..	$117{,}4^b$	$93{,}4^a$	$106{,}5^c$
Couverture plastique ..	$103{,}7^a$	$99{,}4^a$	$115{,}2^b$

Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes ($P \leqslant 0{,}05$).

toujours plus important et que les plantes sont mieux approvisionnées. Cette observation rappelle ce qui a été signalé par ALLMARAS (1971) à propos d'une culture de maïs sous un mulch de paille. De son côté, CORNILLON (1), pour une culture de tomate de primeur, sous un plastique transparent, a observé une augmentation de 50 p. 100 du système racinaire sans modification de la répartition des racines.

— Seule cette technique culturale se différencie significativement des autres pour la grosseur de la *tige* mesurée au-dessus du premier entre-nœud.

(1) (p. 38 d'un article écrit en commun par la Station d'Agronomie, la Station de Bioclimatologie et le Service d'Expérimentation et d'Information du Centre de Montfavet : « Essai de technique culturale sur tomates primeurs de plein champ ». *Plasticulture*, **12**, décembre 1971, 24-53).

— La couverture plastique entraîne une modification positive de la *longueur des épis* ainsi que de leur *qualité de finition*, aussi bien en 1971 qu'en 1972 (tabl. 9). Cette technique présente toujours l'avantage de conduire à un pourcentage plus élevé d'épis bien conformés et plus faible d'épis non terminés.

— *Conditionneur de sol.*

Le conditionneur de sol augmente significativement le rendement en grain (indice de comparaison = 110 pour « témoin » = 100) sans influencer la production de matière sèche des autres parties de la plante. Il agit légèrement sur le volume des racines (largeur) et sur le nombre des plus grosses (tabl. 8). En effet, il se développe, en général, au-dessus du chevelu radiculaire habituel, un deuxième étage de racines fonctionnelles. Pour les épis, le conditionneur se place entre le « témoin » et la couverture plastique (tabl. 9).

TABLEAU 9

Classification des épis suivant leur état de finition

	Témoin	Simazine	Couverture plastique
1971			
Épis bien formés (%)	42^a	28^a	58^b
Épis non terminés (%) ...	43^a	47^a	24^b

	Témoin	Conditionneur de sol	Couverture plastique
1972			
Épis bien formés (%)	35^a	44^a	58^b
Épis non terminés (%) ...	39^a	30^a	17^b

Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes ($P \leqslant 0{,}05$).

4. — *Composition chimique du maïs et prélèvements*

a) *A la sortie de la fleur mâle.*

Des contrôles de la nutrition du maïs sur la sixième feuille, à la sortie de la fleur mâle, indiquent déjà certaines tendances (tabl. 10) que nous avons retrouvées à la récolte :

— l'absence d'action du désherbage chimique et du conditionneur de sol sur la composition de la plante (à l'exception d'un effet de la simazine sur la teneur en soufre) ;

— l'enrichissement en N, P, K et S du maïs cultivé sous le couvert plastique, plus marqué pour le premier essai.

TABLEAU 10

Composition minérale du maïs à la sortie de la fleur mâle
(p. 1 000 MS)

	1971			1972		
	Témoin	Simazine	Couverture plastique	Témoin	Conditionneur de sol	Couverture plastique
Azote	60,6[a]	61,4[a]	64,05[b]	44,9[a]	44,5[a]	45,1[a]
Phosphore	3,27[a]	3,27[a]	3,69[b]	3,99[a]	4,37[a]	5,48[b]
Potassium	21,0[a]	20,5[a]	24,3[b]	19,2[a]	19,5[a]	20,3[a]
Soufre	3,88[a]	3,23[b]	4,66[c]	3,36[a]	3,11[a]	3,72[c]

Différences significatives entre valeurs suivies de lettres différentes ($P \leqslant 0,05$).

TABLEAU 11

Prélèvements de N, P, K et S en kg/ha

	Azote		Phosphore		Potassium		Soufre	
	organes (1) végétatifs	grains	organes végétatifs	grains	organes végétatifs	grains	organes végétatifs	grains
1971								
Témoin	63,35	113,45	4,85	20,65	79,60	24,95	10,40	7,90
Simazine	— 1,65	— 1,20	— 0,50	— 1,45	— 3,70	+ 0,55	+ 0,85	0
	— 2,95		— 1,95		— 3,15		+ 0,85	
Couverture plastique	+ 43,50	+ 47,6	+ 5,75	+ 10,55	+ 46,25	+ 9,25	+ 2,25	+ 7,60
	+ 91,10		+ 16,30		+ 55,50		+ 9,85	
1972								
Témoin	78,40	94,35	12,20	21,80	119,70	30,15	9,40	6,45
Couverture plastique	+ 8,20	+ 18,9	+ 10,20	+ 5,40	+ 18,55	+ 3,90	+ 1,60	+ 1,40
	+ 27,10		+ 15,60		+ 22,45		+ 3,0	
Conditionneur de sol	+ 2,65	+ 8,25	+ 3,15	+ 2,10	+ 11,05	+ 1,80	+ 0,40	+ 0,55
	+ 10,90		+ 5,25		+ 12,85		+ 0,95	

(1) Organes végétatifs = racines + tiges + feuilles + spathes + rachis.

b) *A la récolte.*

— *Simazine.*

Avec les deux systèmes de désherbage, manuel ou chimique, nous enregistrons des prélèvements équivalents (différences non significatives) pour N, P, K et S, en raison de rendements en matière sèche identiques et d'une composition similaire dans les différentes parties de la plante (tabl. 11).

— *Couverture plastique.*

Avec cette technique, il apparaît :

— un enrichissement de la teneur du grain en azote de l'ordre de 6 p. 100, sans aucune modification des teneurs en acides aminés et huiles (1) ;

— une augmentation très nette du taux de phosphore dans les tiges et les feuilles et surtout dans les racines ; toutefois, la teneur en phosphore assimilable de notre sol de limon n'a pas été modifiée par la présence du couvert plastique contrairement à ce que CORNILLON (*loc. cit.* p. 44) a observé pour un limon calcaire ;

— aucune répercussion sur la composition en potassium des diverses parties du végétal ; cependant, le taux de potassium échangeable diminue progressivement dans la couche superficielle (2) (cf. résultats de CORNILLON), à la suite vraisemblablement d'un ralentissement de la libération du potassium (amplitude des variations d'humidité du sol atténuée) et de l'épuisement de cette zone par les racines des plantes ;

— un accroissement sensible de la teneur en soufre du grain et un abaissement de celle des tiges et feuilles, dus probablement à un transfert vers les organes de réserve.

Les suppléments de prélèvements du maïs sous le plastique (tabl. 11) proviennent en majeure partie d'un accroissement de la production de matière sèche, et sont en général, moins élevés dans le second essai. L'effet de cette technique sur les prélèvements d'azote est particulièrement apparent à la fois pour les organes végétatifs et pour les grains (au total plus de 90 kg d'azote supplémentaires par hectare en 1971). Alors que les exportations de potassium sont amplifiées dans les organes végétatifs, celles de soufre s'accroissent essentiellement dans les grains. Quant au phosphore, l'influence du traitement se situe différemment suivant les années considérées.

— *Conditionneur de sol.*

L'utilisation de cette technique culturale reste sans incidence sur les teneurs des différents organes en azote, soufre et potassium. Seul le phosphore des parties végétatives est accru significativement. Les prélèvements du maïs dépendent le plus souvent de la production de matière sèche.

ARRIÈRE-EFFETS DU PREMIER ESSAI

Le maïs du premier essai a été suivi par un blé de printemps, variété « Rex », étudié seulement jusqu'à la floraison. Des analyses préalables d'échantillons de sols (en provenance de l'ensemble du dispositif) témoignent d'une terre encore normale-

(1) Les dosages d'acides aminés et d'huiles ont été réalisés à la Station d'Agronomie de Toulouse par J. DECAU.

(2) Ce fait est contraire à ce qui est généralement constaté sous un mulch de paille (RUSSEL, 1950 ; TROCMÉ, 1956).

ment pourvue en éléments fertilisants : P, K et Mg. Bien que tous les résidus de maïs aient été éliminés, nous n'avons appliqué au blé qu'une fumure très faible : 40 unités d'azote, 70 d'acide phosphorique et 90 de potasse dans le but également de mieux faire apparaître les arrière-effets éventuels. Des prélèvements de blé ont alors été réalisés au tallage, à l'épiaison et à la floraison.

Dans les conditions de l'essai, aucune action n'a été constatée ni sur le tallage, ni sur le rendement en matière sèche à l'épiaison et à la floraison, ni sur le nombre d'épis, à l'exception d'une diminution faible mais significative de ce dernier, là où le plastique avait été installé. Par contre, les teneurs du blé en azote et en soufre ont une tendance, parfois significative, à être supérieures dans les anciennes parcelles traitées à la simazine, et inférieures dans le cas du plastique, celles du blé des parcelles « témoin » occupant toujours une position intermédiaire. Pour expliquer l'infériorité des parcelles recouvertes de plastique, nous pensons qu'il faut éliminer en premier lieu, l'hypothèse d'un début de drainage plus précoce, cause d'un entraînement de nitrates, puisqu'à la récolte du maïs correspondant à la dépose de la couverture plastique, les sols des différentes parcelles sont à peu près dans le même état d'humidité. Il est alors possible de suggérer plusieurs explications pour ces résultats de seconde année : densité moins grande des adventices dans les anciennes parcelles à simazine, disponibilités alimentaires affectées après le couvert plastique sous lequel les prélèvements de maïs ont été amplifiés, persistances éventuelles des pullulations constatées antérieurement sous plastique de *Pratylenchus* et de *Meloïdogyne naasi* agressifs pour certaines céréales dont le blé.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

1. — *Simazine*

Dans notre essai, conduit suivant les conditions de la pratique (densité de semis, nature et dose d'herbicide), en sol de limon de plateaux, et pour l'année considérée, l'effet global du désherbage chimique ne se différencie pas de celui du désherbage manuel bien que quelques petites différences aient été enregistrées, notamment au point de vue microbiologique (augmentation de la microflore totale, diminution des champignons du sol). Ces modifications, dont l'importance s'atténue d'ailleurs progressivement avec le temps, n'affectent que la couche superficielle du sol ; c'est sans doute pourquoi KULINSKA (1967) qui a éliminé de ses prélèvements de sols les deux premiers centimètres, n'a pu mettre en évidence un quelconque effet de ce désherbant sur la microflore totale. Quant au cycle biologique de l'azote, étudié *in vitro*, il ne paraît pas être perturbé, ni dans sa phase d'ammonification, ni dans celle de nitrification, ainsi que l'ont déjà signalé FRENEY (1965) et GROSSBARD (1971). Par contre, nos résultats au champ divergent de ceux de ce dernier : à une légère action positive de la simazine sur l'azote minéral du sol dans nos parcelles cultivées, s'oppose un effet dépressif (22 p. 100), hautement significatif — une seule fois cependant en cinq ans — dans un des essais sans culture de GROSSBARD. A ces faits contradictoires, s'ajoutent les conclusions fort diverses obtenues par d'autres microbiologistes, citées dans une mise au point récente de KAISER (1970) et attribuées à une action variable

des herbicides du groupe triazine selon les types de sols, et également à une influence possible des conditions climatiques de l'année.

Aucune différence n'a pu être décelée en présence de simazine, aussi bien pour la croissance que pour le développement du maïs. A des rendements identiques se superposent une composition presque toujours semblable en N, P, K et S dans les différents organes, et par conséquent des exportations presque équivalentes. En définitive, les quelques modifications temporaires de la microflore du sol provoquées par une seule application de simazine sont restées sans conséquence vis-à-vis de la culture du maïs. Il conviendrait toutefois de vérifier les effets de ce désherbant dans des conditions différentes d'utilisation ainsi que dans le cas très fréquent de la monoculture du maïs où le même traitement herbicide est répété chaque année et où peuvent se produire des accumulations de simazine.

2. — *Couverture plastique*

Les deux années d'expérimentation sur la couverture plastique du maïs ont confirmé, pour un sol de limon de plateaux du Bassin Parisien, certaines observations déjà effectuées sur les cultures par divers auteurs, dans des conditions différentes (climat, sol, plante). En effet, nous avons retrouvé une action favorable sur la germination du maïs, provoquant une levée plus hâtive et plus uniforme, puis une croissance plus rapide et un maintien de cette avance tout au long du cycle végétatif. A la récolte, cette précocité, conséquence des conditions particulières de température et d'humidité crées par la couverture plastique, peut varier suivant le climat du printemps et de l'été, de quelques jours (1972) à deux semaines (1971) ainsi qu'en témoigne la détermination de l'humidité des grains. LEMAIRE (1968) observe sur maïs une précocité du même ordre, s'étalant de trois à neuf jours, tandis que BALLIF et DUTIL (1971) signalent pour une rendzine et avec un film de polyéthylène transparent (supérieur au nôtre pour l'effet thermique) un raccourcissement de 30 jours environ de la durée de végétation.

A ces actions directes du couvert plastique (unifórmisation et augmentation des températures, régularisation de l'humidité, réduction des échanges gazeux, ...), se superposent d'autres actions indirectes. Ainsi, la microflore du sol subit le contrecoup des variations physiques du milieu et voit l'activité de certains de ses groupes modifiée ; les incidences de ces effets, en intervenant dans l'alimentation du maïs, se répercutent alors en chaîne depuis le sol jusqu'à la plante.

Ce sont les cycles biologiques, principalement celui de l'azote, qui sont les plus touchés. L'exaltation de la minéralisation de cet élément conduit dans la couche superficielle du sol à un supplément d'azote minéral (principalement nitrique), de 15 à 80 kg/ha, suivant les années. Mais ce supplément est sous-estimé puisque les dosages d'azote minéral ne traduisent que la résultante des processus producteurs et consommateurs et que les prélèvements azotés des plantes sont plus importants sous le plastique. C'est ainsi que la minéralisation de l'azote paraît moins exaltée en 1971 qu'en 1972 alors que le maïs exporte des suppléments respectifs de 91 et 27 kg d'azote à l'hectare.

La couverture plastique régularise également en surface le cycle biologique du soufre.

En définitive, le plastique en modifiant les facteurs de croissance (conditions

physiques du milieu et conditions d'alimentation) influe favorablement sur la culture. Il provoque un développement plus important du système racinaire qui assure alors une meilleure exploration du sol et une absorption plus intense des éléments facilitée également par une augmentation de la teneur du milieu en gaz carbonique. L'effet sur les cycles biologiques permet un approvisionnement nutritif plus soutenu, entraînant un accroissement de la production de matière sèche et une augmentation de la teneur minérale en certains éléments, observés déjà à la sortie de la fleur mâle. LEMAIRE (1968) indique, pour les régions méditerranéennes, un accroissement de rendement en maïs représentant dans certaines conditions, de 10 à 50 p. 100 du rendement du témoin. Selon BALLIF et DUTIL (1971), en Champagne crayeuse, ces augmentations de rendement varient suivant les variétés et les dates de semis, et peuvent atteindre jusqu'à 25 p. 100. Dans nos essais, nous avons enregistré une différence positive de 26 q/ha en 1971 pour une récolte de 79,1 q/ha dans les parcelles témoin et de 13,5 en 1972 pour 63,1 (à 15 p. 100 d'humidité).

En conclusion, cette technique culturale qui a déjà fourni des résultats encourageants en sol de craie, serait susceptible d'être étendue à des sols de bonne productivité en maïs comme celui de l'essai présenté. Son emploi pourrait également être envisagé dans les travaux de génétique pour l'obtention de nouvelles variétés au même titre que le mulch bitumeux utilisé actuellement. Cependant, il faudrait formuler certaines remarques complémentaires notamment au sujet de la fumure azotée, étant donné que, sous le plastique, si les besoins en azote sont accrus, la minéralisation est meilleure et les pertes sont moins élevées. Dans quelle mesure faudrait-il ajuster la fertilisation pour maintenir le sol en équilibre ? Des expériences factorielles seraient alors nécessaires pour apporter des éléments de réponse. D'autre part, en raison des prélèvements plus intenses de la culture sous le plastique, il faudrait prévoir, pour la rotation, l'apport d'une fumure phospho-potassique plus importante avant la mise en place de cette couverture. De plus, il paraît nécessaire dans le cas d'une rotation maïs-céréales, de surveiller le nématofaune dont certaines espèces sont exaltées sous le couvert plastique. Enfin, la difficulté de l'élimination de ce plastique après usage limiterait largement son emploi, mais des études effectuées dans ce sens à l'échelon industriel permettront sans doute de régler valablement ce problème.

3. — *Conditionneur de sol noirci*

Le conditionneur de sol exerce une double action : par son action physique favorable sur la stabilité structurale, il régularise la germination ; grâce à son pigment noir, il joue un rôle thermique, accélère ainsi cette germination, puis active légèrement la croissance du maïs jusqu'à la récolte avec une augmentation de la production de grain de l'ordre de 10 p. 100, bien que la formation de matière sèche et les diverses teneurs ne soient pas influencées d'une manière significative. Cependant, le conditionneur fournit toujours des résultats à la fois supérieurs au « témoin » et inférieurs à la couverture plastique. Il est possible que des conditions climatiques de printemps plus propices à la culture du maïs accentueraient la tendance positive déjà observée sur la croissance et le développement. D'autre part, l'utilisation de ce produit pourrait éventuellement être envisagée dans les cas où la germination des semences risque d'être entravée (sols battants, compacts), et également remplacer le mulch

bitumeux, toujours difficile à pulvériser. Toutefois, nous ne supposons pas qu'il parviendrait à égaler la couverture plastique (de même couleur) qui, outre son effet thermique plus marqué, intervient davantage dans l'économie de l'eau.

Reçu pour publication en décembre 1974.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à MM. SCOTTO LA MASSESE, Station de Recherches sur les Nématodes (Antibes) et DECAU, Station d'Agronomie de Toulouse, pour les déterminations particulières dont ils ont bien voulu se charger, ainsi que pour leurs interprétations. Une mention toute spéciale doit être faite à M. BUI HUU TRI † et à ses collaborateurs, Station de Science du Sol de Versailles, pour leurs études sur la stabilité structurale et la porosité des sols.

SUMMARY

THE EFFECTS OF SOME TECHNIQUES OF CULTIVATION ON CERTAIN PROPERTIES OF THE SOIL : THE CONSEQUENTIAL EFFECTS ON A MAIZE CROP

A study of the effects of various techniques of cultivation applied on a large scale to maize growing on high yield loam plateaus permitted the following observations to be made, in particular, on the soils' micropopulation :

— a *single weeding* with simazine compared to manual weeding has a temporary effect on the soil microflora without, however, affecting the growth, development or mineral composition of the maize ;

— a *black plastic surface-covering* acts very favourably on the crop (growth, development and composition) by altering the conditions of the medium (firstly physical conditions, then biological and lastly chemical conditions). However, observations must be made on the following crop with particular attention to the feeding and nematofauna of the soil ;

— a *dark soil conditioner*, that has no effect on the soils' biological cycles, acts by a physical process and induces a significant increase in maize yield.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS EINIGER BODENBEARBEITUNGSARTEN AUF GEWISSE EIGENSCHAFTEN DES BODENS : RÜCKWIRKUNGEN AUF EINE MAISKULTUR

Die Untersuchung über die Eigenschaften von verschiedenen Verfahren der Bodenbearbeitung in Mais auf einem schluffigen Boden von guter Fruchtbarkeit, erlaubt die folgenden Feststellungen mit Bezug auf die Population der Mikroorganismen im Boden :

— ein *einmaliges Ausjäten* mit Simazin im Vergleich mit einem von Hand durchgeführten wirkt sich vorünbergehend auf die Mikroflora des Bodens aus, jedoch ohne das Wachstum, die Entwicklung und die mineralische Zusammensetzung des Mais zu beeinträchtigen ;

— eine *Bodenbedeckung mit schwarzem Plastic* erweist sich durch die Veränderung der Boden bedingungen (zunächst der physikalischen, dann der biologischen und schliesslich der chemischen) als sehr vorteilhaft für die Kultur (Wachstum, Entwicklung, Zusammensetzung). Indessen müssen für die folgende Kultur noch Beobachtungen formuliert werden, besonders hinsichtlich der Düngung und Nematodenfauna des Bodens ;

— die *thermische wirkung eines verdunkelten Bodenvesänderungsmittel* ohne Einfluss auf den biologischen Kreislauf des Bodens, wirkt auf physikalischem Weg und führt zu einer signifikanten Erhöhung des Maisertrags.

РЕЗЮМЕ

Действие некоторых агротехнических приемов на свойства почвы : отражение на культуре кукурузы.

Ж. СИМОН-СИЛБЕСТР, Ж. ШАБАНН.

Изучение действия некоторых агротехнических приемов в культуре кукурузы на суглинистой, хорошо окультуренной почве плато, позволило вывести следующие заключения об их влиянии на микро-популяцию этой почвы :

— одноразовая прополка с помощью симазина, в сравнении с ручной прополкой, действует временно на микрофлору почвы, не оказывая вообще никакого действия на рост, развитие и минеральный состав кукурузы;

— покрытие почвы черной пленкой из пласт-массы, изменяя условия среды (прежде всего условия физические, затем биологические, и наконец химические), оказывает очень четкое благоприятное действие на культуру (рост, развитие, состав); необходимо, однако соблюдать некоторые меры предосторожности в виду неблагоприятного действия этого приема на последующую культуру, особенно в смысле удобрения и развития почвенных нематод.

— зачерненный улучшитель почвы — не влияет на ее биологические циклы, действует физическим путем и приводит к показательным увеличениям урожайности кукурузы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAMS J. E., 1967. Early season soil temperature and emergence of grain sorghum and corn. *Agron. J.*, **59**, 595-599.

ADAMS J. E., 1970. Effect of mulch and bed configuration. I. Soil temperature and growth and yield responses of grain sorghum and corn. *Agron. J.*, **62** (6), 785-790.

ALLMARAS R. R., NELSON W. W., 1971 Corn root configuration as influenced by some row-interrow variants of tillage and straw mulch management. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **35** (6), 974-980.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1971. Effet d'un film plastique sur la culture du maïs en Champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric.*, **4**, 286-303.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1973. Croissance du maïs en sol de craie avec et sans film plastique. Rythmes de l'absorption minérale. (Trvx Station Chalons, nº 13).

FRENEY J. R., 1965. Increased growth and uptake of nutrients by corn plants treated with low level of simazine. *Aust. J. Agric. Res.*, **16**, 257-263.

GROSSBARD E., 1971. The effects of repeated field applications of four herbicides on the evolution of carbon dioxide and mineralisation of nitrogen in soil. *Weed Res.*, **11** (4), 263-275.

KAISER P., POCHON J. J., CASSINI R., 1970. Influence of triazine herbicides on soil microrganisms. *Residue Rev.*, **32**, 211-233.

KULINSKA D., 1967. The effect of simazine on soil microrganisms. *Roczn. Nauk Rolnicz.*, **93**, sér. A (2), 229-262.

LEHFELDT J., KULLMANN A., 1972. Wirkprinzipien und Anwendungsveifahren vor Bodenverbesserung physikalischer Bodeneigenschaften. *Arch. Acker Pflanzenbau*, **16** (4-5), 281-300.

LEMAIRE J., 1968. Le paillage plastique. Techniques modernes au service de l'agriculture des pays méditerranéens. *Symp. plastics on crops*. Turin 1967, publié dans *Tech. Comm. of I. S. H. S.*, 1968, *a*, 125-133.

LOISEL Y., 1971. *Études des possibilités de l'emploi de conditionneurs de sol en culture de betteraves industrielles.* Mémoire thèse E. N. I. T. A., Bordeaux, 88 p., dactylographiées.

POCHON J., TARDIEUX P., 1962. *Techniques d'analyse en microbiologie du sol,* 108 p. Édition de la Tourelle.

RÉMY J. C., 1972. Utilisation des conditionneurs de sol en culture de betteraves industrielles. *Inst. tech. Fr. Better. ind.* Compte-rendu 193-199.

VOGEL F., SCHRODER E., 1973. Mulch liquide avec émulsion de bitume, un procédé d'intensification dans la production de légumes en plein champ. *Gärtenbau,* **20** (5), 130-132.

Ann. agron., 1975, **26** (1), 101-103.

CHRONIQUE DES LIVRES

DI CASTRO (F.), MOONEY (H. A.). — MEDITERRANEAN TYPE ECOSYSTEMS. ORIGIN AND STRUCTURE. — Berlin, Springer Verlag, 1973, 405 p. Ecological Studies 7, JACOBS J. *et al.* Éd.).

Ce septième volume de la Collection *Ecological Studies* est publié dans le cadre du Programme Biologique International. Il reprend des travaux présentés et discutés au Symposium organisé par la National Science Foundation of U. S. A., à Valdivia, Chili, mars 1971 et remaniés en 1972.

Indépendamment des différences géographiques de répartition des zones de climat méditerranéen, les écosystèmes présentent des similitudes importantes. L'origine, la structure et le fonctionnement des écosystèmes méditerranéens sont exposés, avec un accent plus particulièrement mis sur les régions Californienne et Chilienne, d'autres régions des autres continents étant abordées dans certains chapitres, à titre comparatif.

Le volume comprend 22 articles groupés en 7 sections : définition générale du concept d'écosystème ; géographie physique incluant climat, paysage et types de sols ; anatomie, structure et fonctionnement des végétaux ; activités animale, microbienne du sol et relation sol-végétation ; biogéographie évolutive végétale et animale ; activités humaines et conséquences.

Comme les précédents ouvrages de cette collection, ce volume est d'une très grande utilité pour les écologistes. Sa présentation est d'excellente qualité. Un index matière fourni en fait un ouvrage de références ainsi que la présence de nombreuses références bibliographiques dans chacun des articles.

L'absence délibérée d'articles plus nombreux sur les continents autres que l'Amérique, plus particulièrement l'Europe est à regretter pour certains de nos lecteurs, mais l'Éditeur lui-même en avertit ceux-ci en rappelant l'existence de travaux de synthèse nombreux sur l'Ancien Monde, appuyant ainsi le choix de développer la diffusion des travaux sur le Nouveau Monde.

Le but de l'Éditeur semble atteint : présenter un ouvrage interdisciplinaire d'étude des écosystèmes méditerranéens, montrant l'existence de différentes approches méthodologiques du problème et leur convergence dans la compréhension des mécanismes de fonctionnement et d'évolution écologiques.

L. D.

RICHARDS (B. N.). — INTRODUCTION TO THE SOIL ECOSYSTEM. — Harlow, Longman, 1974, 266 p.

Cet ouvrage a pour objet de préciser le rôle des êtres vivants du sol dans le fonctionnement et la régulation de l'écosystème terrestre.

L'Auteur définit d'abord le concept d'écosystème, sa structure et ses fonctions en relation avec les organismes vivants du sol.

Après avoir décrit les formes vivantes présentes dans le sol, il effectue l'analyse du fonctionnement de l'écosystème à partir de modèles basés sur la représentation des flux énergétiques et nutritifs. Il étudie ainsi les transferts d'énergie et de matière, leur disponibilité pour les microorganismes, et leur rôle dans le développement des populations microbiennes.

Les trois derniers chapitres sont plus particulièrement consacrés à l'environnement microbien des racines : rizosphère, mycorrhizes et bactéries des nodosités.

L'ouvrage est complété par deux appendices, l'un donnant la signification des symboles utilisés pour la représentation des flux, l'autre un aperçu des techniques de microbiologie du sol.

H. P.

INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ECOLOGY. — PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONGRESS OF ECOLOGY. STRUCTURE, FUNCTIONING AND MANAGEMENT OF ECOSYSTEMS. — The Hague, September 8-14, 1974, Wageningen. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 414 p.

Ce compte rendu du *1er Congrès International d'Écologie* rassemble 98 communications ou résumés de communications regroupés en trois parties principales.

La première partie est consacrée à des thèmes très généraux, flux d'énergie, productivité, diversité et stabilité des systèmes, etc., afin de dégager des concepts communs aux écologistes de différentes disciplines.

Ensuite, figure le résultat final des recherches suscitées dans le cadre de l'International Biological Programme.

Enfin, dans la troisième partie, on y évoque à la fois des méthodes importantes en écologie, constitution et utilisation de modèles, télédétection, photographie aérienne... et certains problèmes particuliers tels que la lutte biologique, l'écologie des parasites ou l'écologie humaine.

Ce volume contient 414 pages et se termine par un index auteur.

A. R.

KLECHKOVSKII (V. M.), POLIKARPOV (G. G.), ALEKSAKHIN (R. M.). — RADIOECOLOGY. — New York, John Wiley and Sons, 1973, 371 p. (Israël Program for scientific translations).

Cet ouvrage, traduit du russe, concerne l'étude des problèmes créés par l'apparition et l'augmentation rapide de la radioactivité artificielle au niveau des biocénoses terrestres et aquatiques à la suite de l'utilisation de plus en plus intense de l'énergie nucléaire.

Les auteurs étudient la transformation et le devenir des radioisotopes dans la biosphère, notamment l'intégration des radioéléments atmosphériques dans le cycle biogéochimique de la matière ; le strontium-90 et le césium-137 ont ici valeur d'exemple et mention est faite du cas particulier du couvert forestier remarquable par sa complexité et sa sensibilité à ce nouveau facteur écologique. Le devenir de ces éléments radioactifs au sein des zoocénoses est abordé également par l'étude de leur accumulation au sein d'un individu et de leur incorporation à tous les niveaux de la chaîne trophique ; les migrations d'oiseaux et d'insectes, le passage de l'élément aquatique à l'élément terrestre au cours de la métamorphose sont autant de facteurs responsables de l'extension de la pollution radioactive.

Les auteurs signalent aussi les conséquences des radiations ionisantes à court et à long terme sur la mortalité, la fécondité, le comportement, ainsi que sur le potentiel génétique des organismes vivants et le phénomène de radiorésistance. Notons que les auteurs ont pu quantifier leurs observations, un chapitre entier est d'ailleurs consacré aux méthodes dosimétriques.

Cet ouvrage contient 371 p., le sommaire réduit à ses grandes parties en est le suivant :

Partie 1 : *Radioécologie des biogéocénoses.*

1) Migration des radioisotopes dans les biogéocénoses ;
2) Effet des radiations ionisantes sur les biogéocénoses ;
3) Aspects radioécologiques des biogéocénoses.

Partie 2 : *Radioécologie des biocénoses aquatiques.*

A. R.

ASSOCIATION INTERNATIONALE POUR L'ÉTUDE DES ARGILES. THE SPANISH CLAY SOCIETY. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE 1972. — Madrid, Spain, June 29-30, 848 p. Division de ciencas C. S. I. C., Madrid, 1973.

Cette publication contient les communications présentées lors de la conférence internationale sur les argiles. Au cours du symposium, qui a réuni 350 participants de 45 pays, les problèmes suivants ont été abordés :

I. — Chimie des cristaux des minéraux des argiles (structures incluses).

II. — Genèse et synthèse des minéraux des argiles.

III. — Propriétés colloïdales des argiles (échanges ioniques inclus).
Symposium sur l'échange de potassium chez les micas.

IV. — Propriétés de surface des argiles (propriétés catalytiques incluses).
V. — Phénomènes d'adsorption.
VI. — Propriétés techniques des argiles et des minéraux des argiles et application.
VII. — Communications générales.
Symposium sur l'analyse quantitative des argiles par diffraction aux rayons X.

Cet ouvrage se termine par des index auteur et matière.

A. R.

HILLEL (D.). — L'EAU ET LE SOL. PRINCIPES ET PROCESSUS PHYSIQUES (Traduit de l'anglais par : DE BACKER (L. W.). Louvain, Vander, 1974, 288 p.

Cet ouvrage est la traduction française de l'ouvrage anglais *Soil and Water* publié par Academic Press en 1971.

Une première partie est consacrée aux principes physiques : propriétés physiques de base des sols, propriétés physiques de l'eau, état de l'eau dans le sol, circulation de l'eau dans les sols saturés et dans les sols non saturés.

La deuxième partie traite du cycle de l'eau au champ : infiltration, redistribution de l'humidité du sol après une infiltration, drainage souterrain, évaporation à partir du sol nu, utilisation de l'eau du sol par les plantes, bilans hydrique et énergétique au niveau du champ.

J. L.

VILLENEUVE (G. O.). — GLOSSAIRE DE MÉTÉOROLOGIE ET DE CLIMATOLOGIE. — Choronoma, les presses de l'Université Laval, Québec, 1974, 560 p.

Tous les spécialistes d'écologie et d'environnement seront intéressés par ce glossaire qui va très loin dans les termes proposés puisqu'on y trouve la définition de nombreux termes locaux du monde entier. Il présente, en outre, l'avantage de fournir un lexique français-anglais et anglais-français.

La compétence de l'auteur, longtemps directeur du service de météorologie du Québec, et de ses collaborateurs, les patientes et minutieuses recherches effectuées donnent une garantie de sérieux à cet ouvrage.

R. D. et L. T.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. CHAUSSIDON (Science du Sol) ou M. HALLAIRE (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. GACHON (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme BONIFACE).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1975

Dépôt légal : 2e trimestre 1975. N° d'impression : 542

annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (2), 105-123.

ÉTUDE PHYSIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LES CONDITIONS NATURELLES

II. — Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince »

A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Au premier chapitre, il a été défini le rôle des différents facteurs climatiques et celui des facteurs liés à la surface, sur le bilan d'énergie et sur la notion d'évapotranspiration potentielle qui s'en dégage. Il sera à présent établi comment les paramètres de surface — résistance ou rétention de l'eau à la surface — interviennent pour modifier cette valeur d'évapotranspiration potentielle. Dans le cas d'une surface « mince », la valeur de l'évapotranspiration réelle, de la température de surface et de la température de rosée à la surface sera donc analysée et formulée, dans les cas successifs d'une résistance, d'une rétention et de la superposition de ces deux phénomènes.

L'étude précédente (chap. I) retraçait les éléments d'analyse de l'évapotranspiration d'une surface et la définition physique de la notion très particulière de l'évapotranspiration potentielle. Cependant, cette étude reposait essentiellement sur une bonne homogénéité thermique et de masse, et sur une faible capacité calorifique du couvert, conditions valables finalement uniquement pour un couvert de faible épaisseur.

Au cours de ce second chapitre, c'est essentiellement l'évapotranspiration réelle, ETR, qui sera analysée et uniquement dans le cas de surfaces où les échanges de masse et d'énergie restent situés au voisinage d'un même plan, feuille, surface d'un sol ou à la rigueur gazon, et non dans le cas où l'évapotranspiration se produit à différents niveaux (couvert végétal à développement vertical par exemple). Le cas du couvert végétal à fort développement vertical (culture agricole ou forêt) fera l'objet du chapitre suivant.

L'ensemble des résultats concernant aussi bien la valeur de ETR que celle des températures de surface T_s et des températures de point de rosée à la surface, T_{rs}, sera exprimé à partir des valeurs particulières ETP_o et T_{so} du cas potentiel pour lequel aucune régulation d'ordre biologique ou aucun frein d'ordre physique (résistance à la diffusion ou rétention) n'apparaît. En effet, les valeurs ETP_o et T_{so} jouent un rôle dominant puisqu'elles sont les bornes vers lesquelles tendent toujours ETR, T_s, T_{rs} lorsque l'eau ne devient pas un facteur limitant ; nous soulignerons cependant, une fois de plus, la notion très spécifique de ETP_o et T_{so} qui dépend étroitement du système choisi, c'est-à-dire des caractéristiques de la surface considérée (chap. I).

LISTE DES SYMBOLES

a, a_1 deux coefficients

b coefficient

c_p chaleur massique de l'air (J kg^{-1} $°C^{-1}$)

C_s concentration au niveau de la surface (kg m^{-3})

C_{so} concentration au niveau de la surface quand il y a ETP_o (kg m^{-3})

D hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique (m)

γ constante psychrométrique ($\gamma = \dfrac{\rho\, c_p h}{HLM/RT}$ en Pa $°C^{-1}$)

γ_r rapport entre coefficient d'échange radiatif et convectif ($\gamma_r = 4\ \varepsilon\sigma T^3/H_o$ en Pa $°C^{-1}$)

E_a évaporation de la surface si elle était à la température de l'air T_a ($E_a = H_o P'(T_a - T_r)$ en W m^{-2})

ETP_o évaporation potentielle de la surface en valeur absolue ($-\Phi_L$)

ETR évapotranspiration réelle au niveau de la surface en valeur absolue (W m^{-2})

e coefficient de rétention de l'eau à la surface ou humidité relative en équilibre avec la surface

e_c valeur critique du coefficient e

ε émissivité de la surface

Φ_L densité de flux de chaleur latente (W m^{-2})

Φ_s densité de flux de chaleur sensible W m^{-2})

Φ_c densité de flux de chaleur par conduction à la surface du sol (W m^{-2})

$G(\theta_s)$ une fonction de l'humidité pondérale (m^2 s^{-2})

H coefficient d'échange convectif de masse entre les niveaux z_h et z_R (m s^{-1})

H_o coefficient d'échange égal à $\dfrac{LM}{RT}$ H (m s^{-1})

h coefficient d'échange convectif de chaleur entre les niveaux z_h et z_R (m s^{-1})

h_o coefficient d'échange égal à $\rho\, c_p h$ (W m^{-2} °C^{-1})
L$_v$ chaleur latente de vaporisation (J kg^{-1})
M masse molaire de l'eau (18 10^{-3}, kg Mole^{-1})
P(T) tension de vapeur saturante pour la température T (Pa)
P′ dérivée de l'expression précédente pour $(T_s + T_r)/2$ (Pa °C^{-1})
ψ_a potentiel thermodynamique de l'air (m^2 s^{-2})
ψ_s potentiel thermodynamique à la surface (m^2 s^{-2})
R constante des gaz parfaits (8,32)
Ra rayonnement atmosphérique (densité de flux radiatif) (W m^{-2})
Rg rayonnement global (densité de flux) (W m^{-2})
Rn rayonnement net pour la surface considérée dans un état donné (densité de flux) (W m^{-2})
Rn_* rayonnement net « climatique » (W m^{-2})
r_a résistance aérodynamique entre les niveaux D et z_R (sm^{-1})
r_s résistance à la diffusion vapeur à travers la surface (s m^{-1})
r_c résistance critique (s m^{-1})
ρ masse volumique de l'air (kg m^{-3})
σ constante de Stefan-Boltzman (W m^{-2} °K^{-4})
T température en °K
T$_a$ température de l'air au niveau de référence (°K)
T$_r$ température du point de rosée de l'air au niveau de référence (°K)
T$_{rs}$ température du point de rosée de l'air à la surface (°K)
T$_s$ température de la surface (°K)
T$_{so}$ température de la surface quand il y a ETP$_o$ (°K)
T$_{sM}$ température maximale de la surface ($\Phi_L = 0$) (°K)
θ_s humidité pondérale du corps au voisinage de la surface
z_R niveau de référence au-dessus de la surface considérée (m)
z_h niveau supérieur du couvert ou de la surface considérée (m)

1. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET TENSION DE SURFACE

Au chapitre précédent, il a été montré comment, à partir de la saturation ($T_s = T_{rs} = T_{so}$) au niveau de la surface d'échange, on définissait une valeur maximale de l'évapotranspiration ou évapotranspiration potentielle ETP$_o$ et une valeur minimale de la température d'équilibre de la surface T_{so} (tabl. 1, première colonne).

Lorsque cette condition particulière d'évapotranspiration potentielle n'est plus satisfaite, l'évapotranspiration diminue. En effet, à la surface d'échange apparaît, pour diverses raisons (rétention de l'eau, zone de diffusion), une concentration de surface C_s inférieure à la concentration d'équilibre C_{so}($T_{rs} < T_{so} < T_s$). Cet abaissement de concentration et par conséquent d'évaporation conduit à un nouveau bilan d'énergie dont la température d'équilibre T_s ne peut qu'augmenter (Van Bavel,

TABLEAU I. — *Différentes formules permettant de calculer ETP et ETR*

1. — *Définitions classiques :*

$$Rn = Rn_* + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T^4) \qquad r_a = 1 \Big/ \int_D^{z_R} \frac{dz}{K(z)} \qquad Ea = \frac{LM}{RT} P'(T_a - T_r)/r_a$$

$$ETP = \frac{P'Rn + \gamma Ea}{P' + \gamma} \qquad ETR = \frac{ETP}{1 + \dfrac{\gamma}{P' + \gamma}\dfrac{r_s}{r_a}}$$

2. — *Nouvelles expressions :*

$$\Phi_R = Rn_* + \Phi_c \qquad H_o = \frac{LM}{RT}\int_{z_h}^{z_R} \frac{dz}{K(z)} \qquad Ea = H_o P'(T_a - T_r)$$

$$\gamma_r = \frac{4\,\varepsilon\sigma T^3}{H_o} \qquad e = \exp\left(\frac{M\psi_s}{RT}\right)$$

avec : $\Gamma = \gamma + \gamma_r$ $\qquad \alpha = \dfrac{\Gamma}{P' + \Gamma}$ $\qquad \beta = \dfrac{P'}{P' + \Gamma}$ $\qquad A = \dfrac{1 - e}{e}$ $\qquad B = \dfrac{RT}{LM} H_o r_s$

Évapotranspiration potentielle	Évapotranspiration avec résistance à la diffusion	Évapotranspiration avec rétention à la surface	Évapotranspiration avec diffusion et rétention
$ETP_o = \dfrac{P'\Phi_R + \Gamma Ea}{P' + \Gamma}$	$ETR = \dfrac{ETP_o}{1 + \alpha B}$	$ETR = \dfrac{ETP_o - \alpha A H_o P(T_r)}{1 + \alpha A}$	$ETR = \dfrac{ETP_o - \alpha A H_o P(T_r)}{1 + \alpha(A + B/e)}$
$T_{so} = T_a + \dfrac{1}{H_o}\dfrac{\Phi_R - Ea}{P' + \Gamma}$	$T_s = \begin{cases} T_r + (T_{so} - T_r)\dfrac{1 + B}{1 + \alpha B} \\ T_{so} + (T_{so} - T_r)\dfrac{P'}{\Gamma}\dfrac{\alpha B}{1 + \alpha B} \end{cases}$	$T_s = T_r + \dfrac{(T_{so} - T_r)/e + \alpha A P(T_r)/\Gamma}{1 + \alpha A}$ $P(T_s) = P(T_{so})\dfrac{\Gamma + P'}{\Gamma + eP'}$	$T_s = T_r + \dfrac{(T_{so} - T_r)\dfrac{B + 1}{e} + \alpha A P(T_r)/\Gamma}{1 + \alpha(A + B/e)}$
$C_{so} = P(T_{so})\dfrac{M}{RT}$	$C_s = \dfrac{M}{RT}[P(T_{so}) - \Gamma(T_s - T_{so})]$	$C_s = \dfrac{M}{RT}[P(T_{so}) - \Gamma(T_s - T_{so})]$ $C_s = C_{so}\,e\dfrac{\Gamma + P'}{\Gamma + eP'}$	$C_s = \dfrac{M}{RT}[P(T_{so}) - \Gamma(T_s - T_{so})]$

1966). Entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle existe une différence de bilan énergétique qui s'écrit :

$$\Delta Rn + \Delta\Phi_s + \Delta\Phi_L + \Delta\Phi_c = 0 \qquad (1)$$

Soit, en explicitant chaque terme (les conditions climatiques et les caractéristiques propres à la surface et au corps restant les mêmes, chap. I) :

$$4\ \varepsilon\sigma T^3(T_s - T_{so}) + h_o(T_s - T_{so}) + H_oP'(T_{rs} - T_{so}) + \Delta\Phi_c = 0 \quad (1\ bis)$$

D'après les définitions de γ et γ_r, on retrouve aussi l'expression très générale de type psychrométrique (fig. 1) :

$$T_s - T_{so} = \frac{P'}{\gamma + \gamma_r}(T_{so} - T_{rs}) \qquad (2)$$

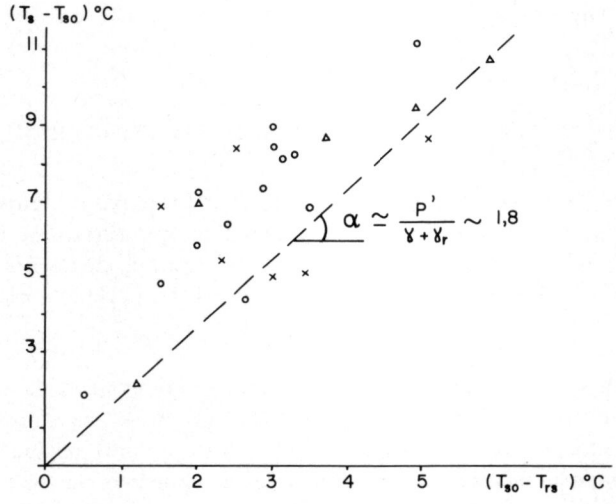


FIG. 1. — *Représentation pour diverses journées* (○ : 1971 ; Δ, × : 1972 ; La Minière) *des écarts mesurés de température entre la surface du sol sec* T_s *et la surface de sol humide* T_{so} *en fonction de l'écart calculé entre cette température et celle du point de rosée de la surface sèche :* $(T_{so} - T_{rs}) = -\Delta\Phi_L/H_oP'$. *Les valeurs minimales généralement obtenues le matin après humidification de la surface humide s'alignent bien sur la pente* $\alpha \simeq \frac{P'}{\gamma + \gamma_r}$ (la surface humide ne reste pas parfaitement humide et voit son évaporation décroître rapidement sous-estimant la valeur $T_{so} - T_{rs}$).

Cette égalité n'est strictement valable que dans le cas où $\Delta\Phi_c/(h_o + 4\ \varepsilon\sigma T^3)$ est négligeable, or précisément $\Delta\Phi_c$ dépend de la température maximale atteinte par la surface au cours de la journée, donc de la valeur de T_s. Cependant, pour de forts coefficients d'échange (forte rugosité, grande vitesse du vent) et pour des faibles flux Φ_c (cas des surfaces formant écran thermique, gazon ou sol sec en surface), ce terme est réellement négligeable.

Cette relation détermine ainsi non seulement le sens de variation de la température de surface T_s et de la température de rosée à la surface T_{rs}, ($C_s = P(T_{rs})$), mais encore le lien constant établi entre ces deux valeurs par rapport à la valeur potentielle (T_{so}) (DAUDET et PERRIER, 1968). Ainsi, plus l'évapotranspiration réelle dimi-

nuera par rapport à la valeur potentielle, plus la température de surface croîtra pour atteindre sa valeur maximale T_{sM} lorsque toute évaporation disparaît (ETR = 0) :

$$T_{sM} = T_{so} + \frac{P'}{\gamma + \gamma_r} (T_{so} - T_r) \tag{3}$$

D'après la relation du bilan d'énergie ou d'après la relation (3) et la valeur de T_{so} (tabl. 1), on peut aussi écrire (IWAKIRI, 1968) :

$$T_{sM} = T_a + \frac{1}{H_o} \frac{Rn_* + \Phi_c}{\gamma + \gamma_r} \tag{4}$$

Cette relation entre les tensions de surface démontre bien le rôle dominant de l'eau et de son état au niveau de la surface d'échange dans l'équilibre thermique (T_s) de la surface (PHILIP, 1957). C'est précisément cet état, lié aux conditions physiques de la surface et aux conditions biologiques, que nous allons essayer de paramétrer pour obtenir l'évapotranspiration réelle.

2. — CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE

Il résulte de l'analyse précédente que le facteur principal de réduction de l'évapotranspiration potentielle réside dans le phénomène qui détermine la valeur de la concentration d'équilibre C_s, ou encore dans la loi qui lie, en dehors de la relation énergétique (rel. 2) cette concentration à la température T_s de la surface.

$$C_s = f(T_s) \tag{5}$$

Deux cas physiques différents et très couramment rencontrés dans les conditions naturelles seront successivement abordés. Les analyses suivantes permettront d'établir pour chacun de ces deux cas et pour la combinaison des deux les formules de l'évapotranspiration ainsi que celles des tensions de surface.

A. — *Cas d'un frein à la diffusion*

Ce cas pratique correspond à une zone de diffusion au niveau de la surface entre l'air et le niveau de vaporisation qui se fait à saturation. Ce phénomène correspond au schéma de la feuille avec son épiderme et sa cuticule percée de stomates, ou encore à celui d'un sol présentant une mince couche de sol sec et poreux ou un fin paillage. Ce schéma diffère de celui correspondant à ETP_o par le fait que la concentration d'équilibre à la surface (ou température de point de rosée à la surface T_{rs}) n'est plus déterminée par la température de surface ($P(T_{rs}) < P(T_s)$ à saturation), mais par l'intensité du flux et la valeur du frein à la diffusion ou résistance r_s(s m^{-1}) ; ce frein entre la zone de saturation à la température T_s et la surface est du aux propriétés de la surface poreuse et à son épaisseur (FUCHS and TANNER, 1967 ; PERRIER, 1970) :

$$\Phi_L = \frac{LM}{RT} P' \frac{(T_{rs} - T_s)}{r_s} \tag{6}$$

Cette expression, combinée à l'expression de ce même flux entre la surface et le

niveau de référence z_R conduit à la relation classique de la densité de flux de chaleur latente dans le cas d'une résistance additionnelle (T_r, la température du point de rosée de l'air)

$$\Phi_L = H_o P' \frac{(T_r - T_s)}{H r_s + 1} \qquad (7)$$

Cependant, il est nécessaire de considérer une couche mince, homogène en température (T_s), qui ne présente donc pas de gradient important entre ses deux faces (cas de l'épiderme de la feuille). Lorsqu'il y a gradient de température entre la zone à saturation où se produit l'évaporation et la surface, il est nécessaire de corriger ce schéma par le flux conductif à travers la couche, lié à ce gradient (PERRIER, 1970).

La résolution de cette relation (7), compte tenu du bilan d'énergie et de l'expression de la densité de flux de chaleur sensible, conduit, comme dans le cas d'ETP (chap. I), à l'expression de ETR (tabl. 1, deuxième colonne) dont une illustration est donnée par la figure 2. Cette expression est très voisine de celles données par TANNER et PELTON (1960), MONTEITH (1965), BLACK *et al.* (1970) (tabl. 1, définitions classiques).

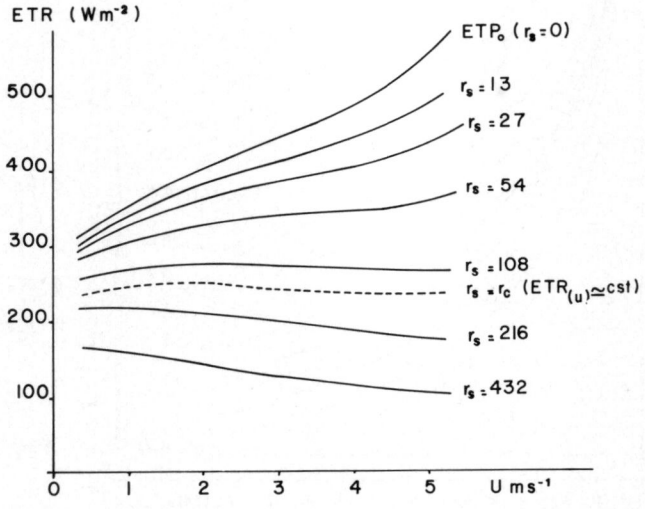


FIG. 2. — *Évolution de l'évapotranspiration réelle d'un sol en fonction de la vitesse du vent et pour différentes valeurs de la résistance* r_s *de la couche sèche superficielle.* ETR calculée pour un rayonnement net climatique d'environ 500 W m^{-2}, une température de l'air de 23,5°C et une température de point de rosée de 16°C, et pour un coefficient H_o mesuré en fonction de la vitesse du vent (à 3 m).

La température de surface T_s et la température du point de rosée à la surface (rel. 2) découlent aussi de cette même analyse (tabl. 1, deuxième colonne et illustration fig. 3).

Ainsi la température de surface et la température de rosée à la surface ne dépendent donc que des paramètres d'échange H et r_s et de la température d'équilibre T_{so} obtenue dans le cas de l'évapotranspiration potentielle (fig. 3).

La résistance r_s varie de zéro lorsqu'on a saturation à la surface (ETP_o), à l'infini lorsque la surface devient entièrement imperméable à la vapeur d'eau (film plastique à la surface du sol par exemple). Cette résistance conduit à une évapotranspiration réelle d'autant plus faible qu'elle est plus grande, toute autre condition

restant égale (ETP_o = cst). L'évapotranspiration réelle évolue dans les mêmes proportions qu'ETP_o en fonction des facteurs climatiques (Rn, T_a, T_r) :

$$ETR = a\ ETP_o \tag{8}$$

mais évolue de façon assez différente en fonction de la vitesse du vent (fig. 2), car le

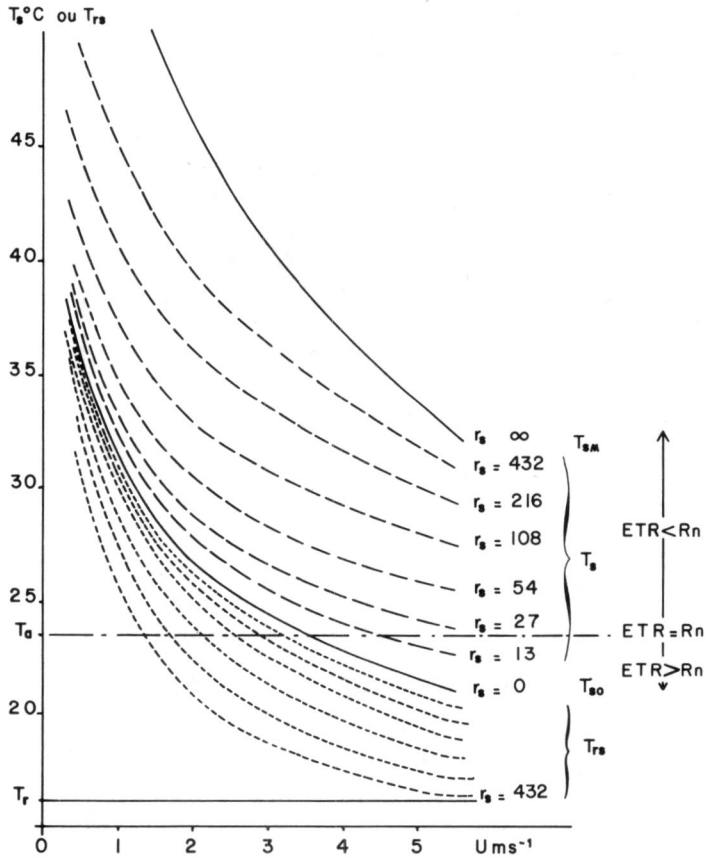


FIG. 3. — *Évolution des températures de surface et des températures de point de rosée à la surface d'un sol en fonction de la vitesse du vent* (3 m de hauteur) *et de la résistance à la diffusion dans la couche sèche superficielle* (calcul à partir des mesures de H_o et pour un rayonnement net climatique de l'ordre de 500 W m^{-2})

coefficient d'échange intervient à la fois dans ETP_o et dans le coefficient a (tabl. 1, deuxième colonne). En effet, le vent par l'intermédiaire du coefficient H intervient de façon différente, suivant la valeur du frein r_s à l'évaporation (DAUDET et PERRIER, 1968). Il existe ainsi une valeur critique r_c telle que, pour $r_s < r_c$, l'évapotranspiration croît avec H mais d'autant moins que le frein à l'évaporation r_s est plus proche de la valeur de r_c. Pour toute valeur de r_s supérieure à r_c apparaît une évolution inverse entre ETP_o et ETR : ETR décroît avec la vitesse du vent (fig. 2). Cette valeur ne dépend pratiquement que des conditions climatiques :

$$r_c = \frac{LM}{RT} \frac{(T_a - T_r)}{(Rn_* + \Phi_c)} \left[(P' + \gamma) + 2\,\gamma_r + \frac{\gamma_r^2}{\gamma} \right] + \frac{\gamma_r}{\gamma} \frac{1}{H} \tag{9}$$

qui, en première approximation, principalement pour H grand donc γ_r petit, peut s'écrire :

$$r_c \simeq \frac{LM}{RT} \frac{(T_a - T_r)}{(Rn_* + \Phi_c)} (P' + \gamma) \qquad (9\ bis)$$

En conclusion, si nous cherchons à analyser l'action des différents facteurs sur l'évapotranspiration en fonction de la variable vent, il est possible de souligner que :

— le meilleur moyen de diminuer l'évapotranspiration se situe au niveau de la résistance r_s (fig. 2), avec, pour les faibles valeurs de r_s par rapport à r_c, un avantage certain à réduire aussi les valeurs de la vitesse du vent. Ce résultat met en relief le rôle dominant que peuvent jouer les antitranspirants (accroissement de r_s) et le fait que plus les surfaces considérées sont dans de bonnes conditions hydriques (r_s petit), plus l'aménagement du paysage en vue d'une réduction de la vitesse du vent est important ;

— toute réduction du déficit de saturation conduit aussi à une diminution corrélative de l'évapotranspiration réelle :

$$\Delta(ETR) = \Delta(T_a - T_r) \frac{\rho c_p P' H}{(P' + \gamma + \gamma_r) + (\gamma + \gamma_r) H r_s} \qquad (10)$$

réduction qui est d'autant plus importante que la vitesse du vent est plus faible. Ainsi un aménagement régional qui va dans le sens d'une diminution de la vitesse du vent, pour une région à fort déficit de saturation est très bénéfique ;

— par contre, si toute réduction du rayonnement net Rn_* conduit généralement aussi à une diminution de l'évapotranspiration :

$$\Delta(ETR) = \Delta(Rn_*) \frac{P'}{(P' + \gamma + \gamma_r) + (\gamma + \gamma_r) H r_s} \qquad (11)$$

une réduction corrélative de la vitesse du vent réduit généralement cet effet et rend moins efficace une diminution de Rn_*.

B. — *Cas du potentiel de surface lié à l'humidité*

Dans le cas précédent, le paramètre de régulation, déterminé par les caractéristiques de la surface, était une résistance r_s fixe et indépendante du flux ; par contre, la concentration de surface C_s s'ajustait en fonction du flux (tabl. 1, deuxième colonne et relation 6). On considèrera à présent le cas où le potentiel thermodynamique à la surface est imposé par cette surface, potentiel qui détermine, de façon quasi indépendante du flux, la concentration de surface C_s.

Considérons une surface dont l'humidité de surface θ_s est entretenue par la diffusion liquide de l'eau provenant de la masse du sol ou des tissus végétaux. Compte tenu des caractéristiques propres à la structure physico-chimique du corps, il existe une relation « potentiel hydrique et humidité » bien définie, à quelques effets secondaires près, tels que l'hystérésis. Quoi qu'il en soit, à une humidité θ_s correspond un certain potentiel thermodynamique ($\psi_s = -G(\theta_s)$) qui, à l'équilibre, correspond lui-même au potentiel de la vapeur d'eau à la surface du corps. Ce potentiel s'écrit :

$$\psi_a = \frac{RT}{M} \operatorname{Log} \frac{P(T_{rs})}{P(T_s)} \qquad (12)$$

et compte tenu de l'égalité des potentiels entre l'air et le sol au niveau de la surface ($\psi_s = \psi_a$), on définira un coefficient de rétention e, ou humidité relative en équilibre ($P(T_{rs})/P(T_s)$), tel que :

$$e = \exp\left(\frac{M\psi_s}{RT}\right) \qquad \text{ou} \qquad \exp\left(-\frac{MG(\theta_s)}{RT}\right) \tag{13}$$

ou encore

$$C_s = e\,\frac{M}{RT}\,P(T_s) \tag{13 bis}$$

— e prend la valeur unité dans le cas d'un potentiel nul ; la surface est alors à saturation et l'on tombe dans les conditions mêmes de l'évapotranspiration potentielle ;

— e prend une valeur positive quelconque inférieure à 1 suivant la valeur du potentiel de surface donc de l'humidité θ_s. Plus cette humidité sera faible, plus le coefficient e imposé par la structure du sol en surface et par θ_s sera petit et voisin de zéro.

Cependant, il existe une valeur particulière de e par rapport aux conditions climatiques externes et par rapport aux paramètres d'échanges (H_o ou h_o) de la surface. Cette valeur charnière est celle qui sépare l'évaporation de la condensation et correspond à l'absence de gradient de concentration entre la surface et l'air au niveau de référence climatique z_R, ($P(T_{rs}) = P(T_r)$). Dans ces conditions, l'équilibre de potentiel entre la surface ψ_s et l'air au voisinage de la surface s'écrira (rel. 12) :

$$\psi_s = -G(\theta_s) = \frac{RT}{M}\,\mathrm{Log}\,\frac{P(T_r)}{P(T_s)}$$

où T_s prend la valeur T_{sM} définie aux relations 3 et 4 puisque l'évaporation est nulle ; ainsi :

$$\begin{aligned} &\frac{P(T_r)}{P(T_{sM})} < e \qquad \text{il y a évaporation} \\ &\frac{P(T_r)}{P(T_{sM})} > e \qquad \text{il y a condensation} \end{aligned} \tag{14}$$

Pour des conditions climatiques données, T_r évoluant peu, la grande variation de ce rapport dépend de T_{sM} qui est d'autant plus petit (rel. 4) que T_a est plus petit, que les échanges sont plus grands (H_o grand) et le terme ($Rn_* + \Phi_c$) plus petit en valeur algébrique ($Rn_* + \Phi_c < 0$ de nuit).

Le plus souvent, de nuit, la diminution de T_{sM} est telle que le rapport devient supérieur à 1 ($T_r > T_{sM}$) et, quelle que soit la valeur de e (même $e = 1$, cas de la saturation), il y a condensation. Ceci explique que la condensation se poursuive de nuit alors qu'elle entraîne très rapidement une resaturation de la surface ($e \to 1$). Pour des valeurs du rapport ($P(T_r)/P(T_{sM})$) inférieures à 1 mais supérieures à e, l'apparition de la condensation contribue à augmenter la valeur de e et à freiner la condensation. Généralement, dans ces conditions de condensation, le coefficient e devient rapidement voisin du rapport climatique $P(T_r)/P(T_{sM})$ et évolue constamment au voisinage de ce dernier, réduisant à très peu l'importance de la condensation qui reste d'autant plus limitée que la diffusion de l'eau vers les couches sous-jacentes à la surface du sol est plus faible.

Deux types de conditions climatiques essentiellement nocturnes apparaîtront :

— celles où le rapport $P(T_r)/P(T_{sM})$ est inférieur à l'unité, les condensations restant faibles car e tend très vite vers cette valeur ;

— celles où ce rapport prend des valeurs supérieures à l'unité ; dans ce cas, la condensation se poursuit de façon continue même lorsque e a atteint sa valeur maximum qui est l'unité.

Dans le cas d'une évaporation ($e > P(T_r)/P(T_{sM})$, l'expression du flux de chaleur latente qui s'écrit classiquement (chap. I) :

$$\Phi_L = LH(C_a - C_s) = H_o P'(T_r - T_{rs})$$

peut se mettre, compte tenu de la relation 13 *bis*, sous la forme suivante :

$$\Phi_L = H_o\,[eP'(T_r - T_s) + (1 - e)P(T_r)] \qquad (15)$$

La densité de flux de chaleur latente dépend bien du terme d'équilibre (T_s la température de surface) et de la température du point de rosée de l'air, mais aussi du coefficient e, paramètre de régulation de la surface.

Comme pour le cas précédent, il est alors possible de calculer l'évapotranspiration réelle à partir de la relation 15 et de celle du bilan d'énergie (chap. I), ainsi que l'expression de la température T_s d'équilibre à la surface (tabl. 1, troisième colonne). Une illustration de la variation de ces grandeurs en fonction de la vitesse du vent est donnée par les figures 4 et 5. Il est possible de montrer que cette relation donnant T_s et par conséquent T_{rs} (rel. 2) peut aussi se mettre sous la forme réduite suivante (multiplication par P') :

$$P(T_s) \sim P(T_{so})\,\frac{\gamma + \gamma_r + P'}{\gamma + \gamma_r + eP'} \qquad (16)$$

et

$$P(T_{rs}) \sim P(T_{so})\,e\,\frac{\gamma + \gamma_r + P'}{\gamma + \gamma_r + eP'} \qquad (16\ bis)$$

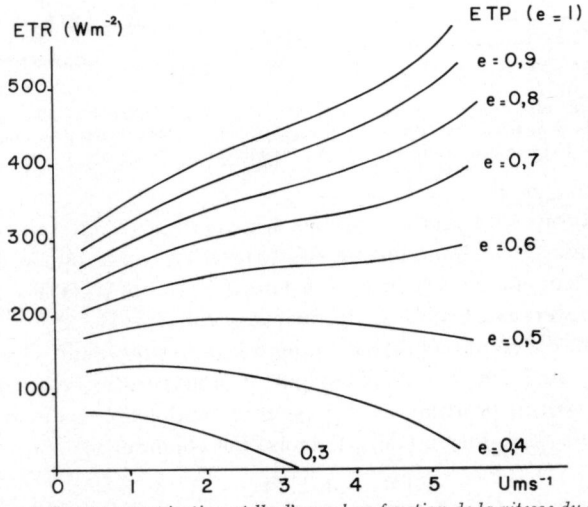


FIG. 4. — *Évolution de l'évapotranspiration réelle d'un sol en fonction de la vitesse du vent et pour différentes valeurs du coefficient* e *lié à la rétention de l'eau à la surface.* ETR calculée pour un rayonnement net climatique voisin de 500 W m^{-2}, une température de l'air de 23,5°C et une température de point de rosée de 16°C, et pour un coefficient H_o mesuré en fonction de la vitesse du vent (à 3 m).

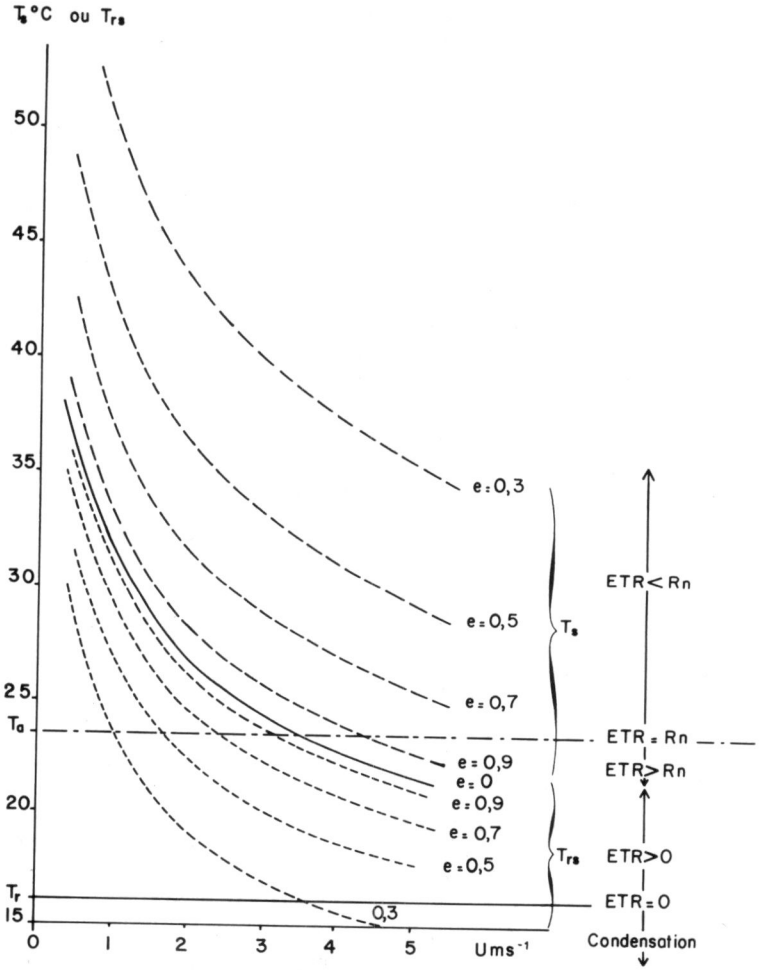


FIG. 5. — *Évolution calculée de la température de surface et de la température du point de rosée à la surface d'un sol en fonction de la vitesse du vent* (mesurée à 3 m) *et pour différentes valeurs du coefficient* e ($Rn_* \simeq 500$ W m^{-2}, $T_a = 23{,}5$°C et $T_r = 16$°C, H_o mesuré).

Ces deux relations sont bien conformes à la relation (2) et confirment que seuls la valeur climatique de la température de surface T_{so} correspondant à ETP_o et le coefficient e interviennent pour fixer les tensions d'équilibre T_s et T_{rs}, alors que, dans le cas précédent, intervenait aussi le coefficient d'échange H.

Ces expressions diffèrent en particulier des relations précédentes (tabl. 1, deuxième colonne et rel. 8 où $ETR = a\ ETP_o$) par un nouveau terme au numérateur qui montre que l'évapotranspiration n'est plus proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle, mais est de la forme (tabl. 1, troisième colonne) :

$$ETR = a_1\ ETP_o - b \qquad (17)$$

Par comparaison avec la relation 8, ce terme correctif b souligne une diminution de la valeur de ETR par rapport à une même valeur ETP_o et peut conduire dans

certains cas à une condensation (fig. 4 et 5). En effet, dès que la valeur de e diminue, l'évapotranspiration est réduite et n'apparaît même qu'aux environs d'un rayonnement global de 100 W m^{-2} pour une valeur e de 0,6, et uniquement vers 450 W m^{-2} pour une valeur e de 0,3 (fig. 6), ce qui explique les condensations nocturnes et matinales pouvant se prolonger assez tard après le lever du soleil dans le cas d'une surface très sèche ($e < 0{,}6$).

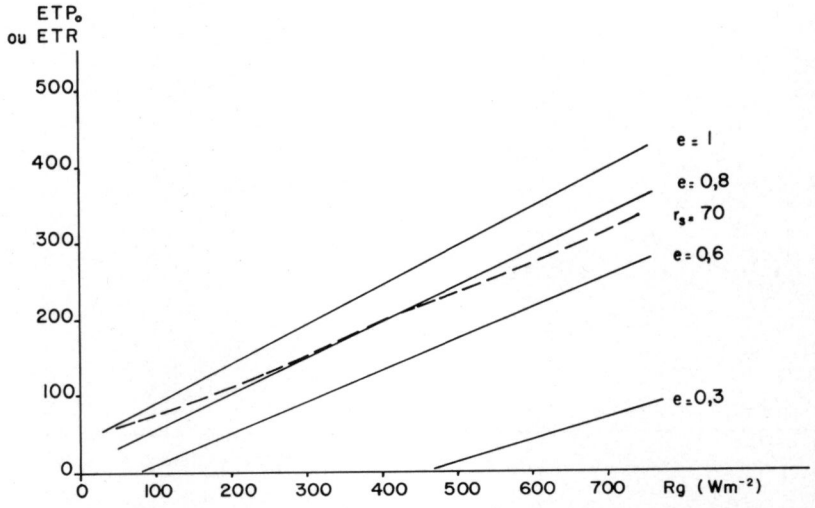


FIG. 6. — *Évolution, pratiquement linéaire pour le sol considéré, de l'évapotranspiration en fonction du rayonnement global et pour un rayonnement atmosphérique d'environ 350 W m^{-2}* ($T_a \sim 23{,}5$°C et $T_r \sim 16$°C). La courbe en tirets retrace l'évolution d'ETR pour une valeur de r_s donnant une évapotranspiration réelle voisine d'un coefficient e de 0,8.

L'évapotranspiration réelle d'une surface à potentiel donné décroît régulièrement lorsque ce potentiel diminue en valeur algébrique (e plus petit) (GARDNER and HILLEL, 1962). Naturellement, lorsque le potentiel atteint une valeur telle que e prend sa valeur charnière (rel. 14), on démontre bien que la valeur d'ETR devient nulle (le rapport $(1 - e)/e$ prenant la valeur $(P(T_{sM}) - P(T_r))/P(T_r)$).

Comme au paragraphe précédant, ETR est une fonction croissante de la vitesse du vent, tout comme ETP, mais uniquement pour une certaine gamme de la valeur de e. La valeur critique de e est sensiblement

$$e_c = \frac{P(T_r)}{P(T_a)}$$

En dessous de cette valeur, il y a, comme dans le cas précédent, décroissance de l'ETR en fonction de la vitesse du vent (fig. 4).

C. — *Cas combiné*

Le plus souvent, qu'il s'agisse des couverts (feuilles avec couche de diffusion cuticulo-stomatique, r_s et avec rétention, e, aux niveaux des cellules) ou des sols lorsqu'ils deviennent secs en surface (couche de sol sec avec zone de diffusion, r_s,

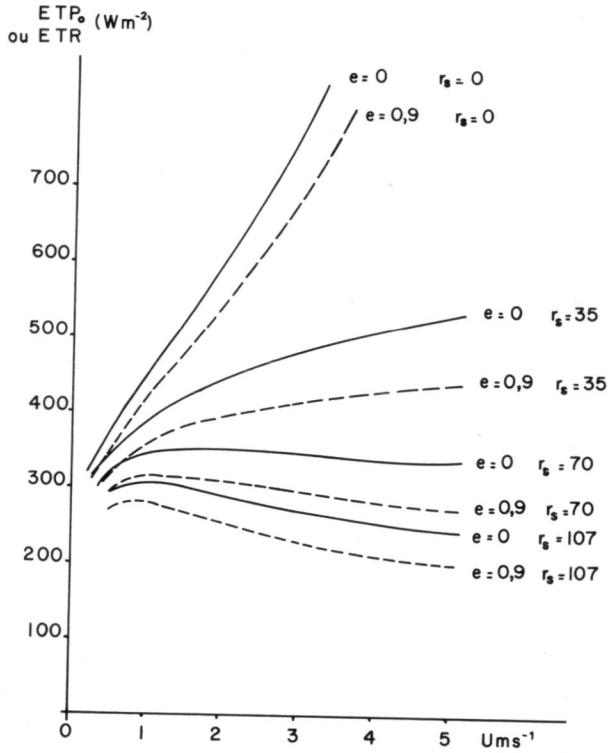


FIG. 7. — *Évolution calculée des évapotranspirations d'une surface très rugueuse* (jeune plantation de Maïs) *en fonction de la vitesse du vent pour différentes valeurs associées de* e *et de* r_s (H_o mesuré, $Rn_* \simeq 500$ W m^{-2}, $T_a = 23{,}5$°C, $T_r = 16$°C).

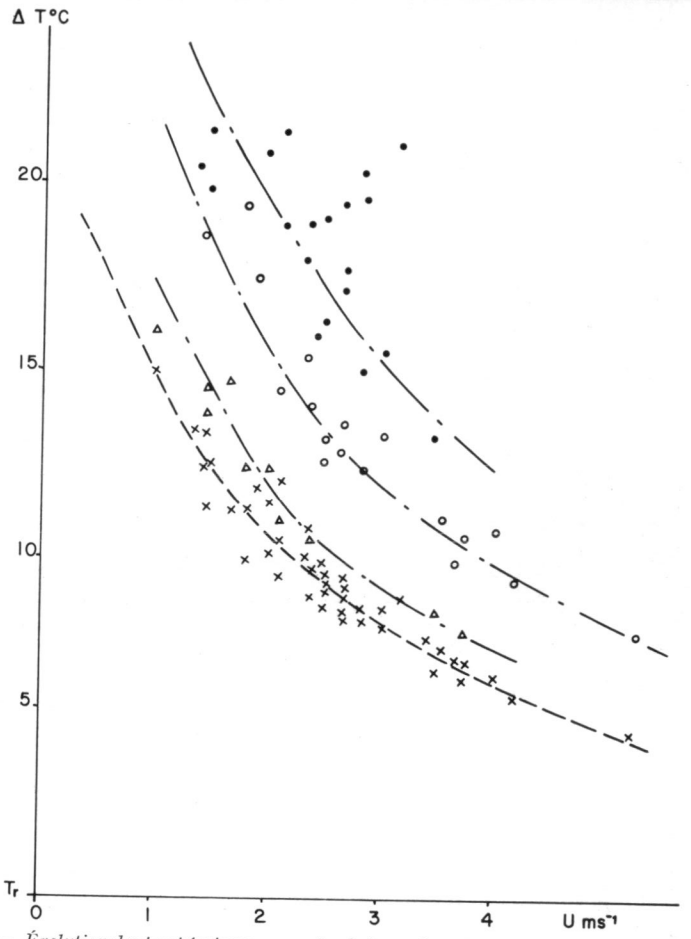


FIG. 8. — *Évolution des températures mesurées de la surface d'un sol sec par rapport à la température mesurée du même sol humide* (×). Chaque valeur a été corrigée en fonction des valeurs mesurées de R*n*, T_r et T_a pour être ramenée arbitrairement à une même valeur de T_a, T_r et de R*n* afin d'éliminer les fluctuations d'ordre climatique.

△ valeur des températures de surface 1 à 2 j après une pluie
○ valeur des températures de surface 3 à 5 j après une pluie
● valeur des températures de surface 6 à 9 j après une pluie

et zone d'évaporation sous-jacente avec rétention de l'eau, e), le cas combiné qui associe successivement les deux types de régulation au niveau des surfaces traduit avec plus de précision la réalité.

Les solutions sont très voisines (tabl. 1, quatrième colonne) tant pour ETR que pour T_s et font bien ressortir le rôle combiné de la résistance r_s et du coefficient de rétention e.

Il suffit d'analyser (fig. 7) les résultats donnés par cette formule générale d'ETR pour constater qu'il y a addition des deux effets et que les caractéristiques propres aux deux types d'évapotranspiration réelle se retrouvent plus ou moins accentués par l'autre cas. La figure 8 donne une illustration de la répartition des températures de surface d'un sol en fonction du nombre de jours après la dernière pluie ; ce cas souligne l'évolution complexe de la température de surface d'un sol où apparaissent à la fois les deux paramètres r_s et e.

3. — CONCLUSIONS

Il est important de noter que toutes ces relations sont établies pour deux conditions précises :

— La surface d'échange est une zone plane plus ou moins rugueuse, d'épaisseur très faible et sans inertie thermique. Cette zone, où se situe le point de départ de tous les échanges considérés dans le bilan énergétique, est, d'autre part, une zone homogène en moyenne. Nous avons vu que ces conditions correspondent au cas des surfaces d'eau, des sols ou matériaux humides, mais uniquement sur une faible épaisseur. Un tel modèle peut aussi traduire le cas des couverts très ras, sans développement vertical. Par contre, le cas des couverts à développement vertical, couverts agronomiques ou forestiers, fera l'objet du chapitre suivant ; quant à celui d'un corps dont l'évaporation se ferait en profondeur, il a fait l'objet d'une étude précédente (PERRIER, 1970).

— Les régimes considérés sont des régimes permanents ou lentement variables au cours de la période diurne, car à l'exception de l'expression utilisée pour la densité de flux dans le sol, tous les autres supposent qu'à chaque instant, l'équilibre est atteint, et qu'il n'y a, par conséquent, pas d'inertie dans l'établissement des profils de température et de concentration qui régissent les flux instantanés ; cette inertie engendrerait un retard dans les flux de chaleur latente et de chaleur sensible et l'équation de base, équation du bilan d'énergie, ne serait plus exacte.

Sous ces conditions, assez bien réalisées généralement par temps pas trop variable dans le cas des surfaces naturelles et des couverts sans développement vertical, il est possible de souligner les deux observations suivantes :

a) Tout d'abord, le rôle particulier joué par l'évaporation ou évapotranspiration potentielle telle qu'elle a été définie (chap. I). En effet, cette notion, qui n'est pas purement théorique (vérification expérimentale possible par forte irrigation par aspersion), permet de définir et de calculer une valeur maximale des pertes en eau qui est indépendante de l'alimentation hydrique de la surface — alimentation vapeur ou liquide au niveau de cette surface —. Enfin, à cette valeur ETP_o correspondent

des valeurs d'équilibre définies par la température d'équilibre T_{so} qui est aussi la température de rosée à la surface, ($P(T_{so})$ étant la pression de vapeur saturante correspondant à la concentration de surface). Cette température d'équilibre attachée à ETP_o marque une valeur limite déterminante à partir de laquelle s'ajustent les valeurs d'équilibre T_s et $P(T_{rs})$ dans le cas de l'évaporation réelle (voir relation 2), tous facteurs d'ordre climatique ou physique propres à la surface en dehors de ceux liés à l'eau (r_s et e) restant égaux.

b) La réduction de l'évaporation ou de l'évapotranspiration par rapport à la valeur potentielle ETP_o apparaît nettement en fonction de deux paramètres de nature différente (r_s et e). Ces deux paramètres agissent par ailleurs de façon distincte :

— La réduction due à r_s est indissociable de la valeur du coefficient d'échange H qui accroît ou diminue le rôle de r_s.

— La réduction due au rapport $\left(\frac{1 - e}{e}\right)$ intervient au numérateur par combinaison avec le terme $H_oP(T_r)$ qui dépend de la concentration de l'air en vapeur d'eau et du coefficient d'échange H, et intervient aussi au dénominateur comme le fait Hr_s.

Ce chapitre montre qu'à la définition simple sous l'angle physique de l'évapotranspiration potentielle, qui n'a qu'une valeur très relative puisque valable uniquement pour un couvert donné, correspondent des évapotranspirations réelles de ce même couvert, très variables suivant les paramètres climatiques (Rn_*, ($T_a - T_r$), H, $P(T_r)$) et les paramètres de régulation (r_s et e). En fonction de la nature de cette régulation (diffusion ou rétention) de l'évapotranspiration, le mode d'évolution de l'évapotranspiration réelle suivant les facteurs climatiques sera très différent (fig. 9 *a* et *b*). Il n'est donc pas toujours possible de tout ramener à un problème fictif de type « diffusion », surtout si les potentiels thermodynamiques de l'eau sont élevés (forte rétention) au niveau de la zone d'évaporation.

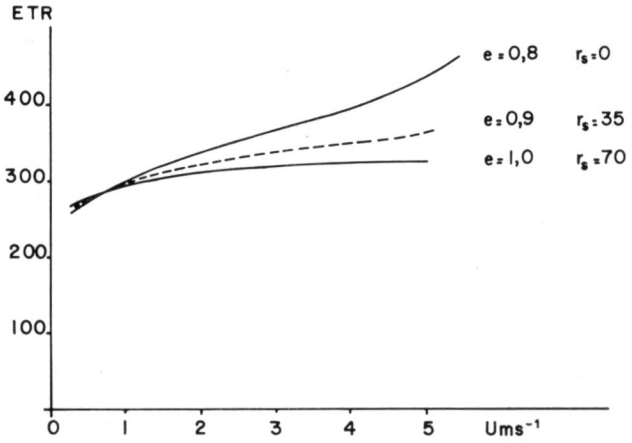


FIG. 9 *a*. — *Évolution calculée en fonction de la vitesse du vent de l'évapotranspiration d'un sol* (H_o mesuré) *pour différentes combinaisons des paramètres* e *et* r_s *conduisant à des valeurs voisines d'ETR* ($Rn_* \simeq 500$ W m^{-2}, $T_a = 23{,}5$°C, $T_r = 16$°C).

Un tel schéma d'analyse de l'évapotranspiration réelle donne l'expression des deux grandeurs agronomiques et énergétiques essentielles (ETR et T_s) et le sens de leur évolution en fonction des paramètres climatiques classiques mais aussi de paramètres de régulation relatifs à des caractéristiques mesurables propres à la surface. En effet, le coefficient e est lié à l'humidité de surface θ_s et à la loi humidité-potentiel du corps ; quant à r_s, il dépend de la résistance stomatique ou des caractéristiques du sol en surface (épaisseur de sol sec, porosité...).

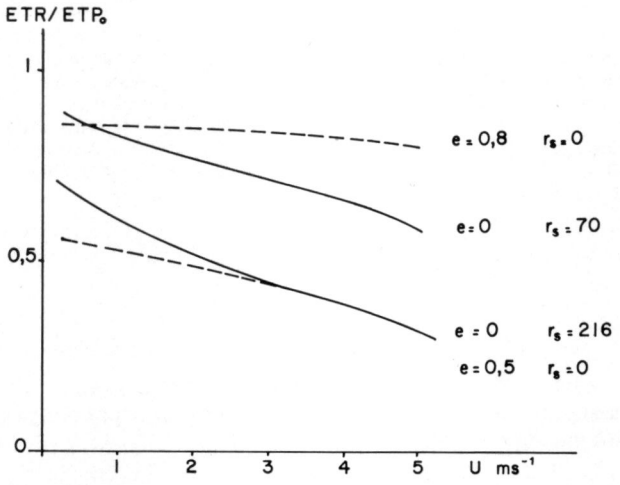


FIG. 9 *b*. — *Évolution calculée en fonction de la vitesse du vent du rapport* ETR/ETP_0 *pour différentes valeurs des paramètres* e *et* r_s *à la surface d'un sol* (mêmes conditions).

C'est précisément, suivant les régulations présentes (r_s ou e), la nature et l'importance de l'évolution de l'évapotranspiration réelle en fonction des facteurs climatiques qu'il est nécessaire de bien connaître. En effet, le rôle des actions agronomiques de type microclimatique dans le domaine de la consommation en eau et du bilan thermique des surfaces en résulte très directement.

Reçu pour publication en novembre 1974.

SUMMARY

PHYSICAL STUDY OF EVAPOTRANSPIRATION IN NATURAL CONDITIONS.
II. — FORMULATIONS AND PARAMETERS FOR ACTUAL EVAPOTRANSPIRATIONS OF A THIN SURFACE

The previous chapter defined through the energy balance and the deductive conception of potential evapotranspiration the various roles play by climatic factors and surface parameters. This chapter establishes how surface parameters like resistance or water retention at the surface act to modify potential evapotranspiration. In the case of a thin surface layer, actual evaporation, surface temperature and surface dew point temperature is formulated and analysed respectively in case of resistance, water retention and combinated both phenomena.

ZUSAMMENFASSUNG

II. — AUSDRÜCKE UND PARAMETER, DIE DIE REELLE EVAPOTRANSPIRATION EINER « DÜNNEN » OBERFLÄCHE BESCHREIBEN

Im ersten Kapitel wurde die Rolle definiert, die die verschiedenen Klimafaktoren für den Energiehaushalt und für die davon unabhängige potentielle Evapotranspiration spielen. Jetzt soll festgestellt werden, wie die Parameter der Oberfläche — Widerstand oder Wasserbindung an der Oberfläche — eingreifen, um diesen Wert der potentiellen Evapotranspiration zu verändern. Für den Fall einer « dünnen » Oberfläche, werden dann die Werte der tatsächlichen Evapotranspiration, der Oberflächentemperatur und der Temperatur der Benetzung an der Oberfläche analysiert und auf eine Formel gebracht für die nacheinanderfolgenden Fälle des Widerstandes, der Wasserbindung und der Uberlagerung dieser beiden Phänomene.

РЕЗЮМЕ

Физическое изучение эвапотранспирации в природных условиях. — 2) Выражения и параметры реальной эвапотранспирации скудно покрытой поверхности.

А. ПЕРРЬЕ

В первой главе определяется влияние разных климатических и связанных с поверхностью факторов на энергитический баланс и на выделяющееся из него понятие потенциальной эвапотранспирации. Затем рассматривается участие параметров поверхности — водоустойчивости, или удержания воды на поверхности — в изменениях величин потенциальной эвапотранспирации. И, наконец, анализируются и формулируются для каждого отдельного случая устойчивости, водоудержания и для обоих явлений вместе, величина реальной эвапотранспирации скудно покрытой поверхности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLACK T. A., TANNER C. B., GARDNER W. R., 1970. Evaporation from a snap bean crop. *Agron. J.*, **62** (1), 66-69.

DAUDET F. A., PERRIER A., 1968. Étude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. Gén. Therm.*, VII (76), 353-364.

GARDNER W. R., HILLEL D. I., 1962. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. *J. Geophys. Res.*, **67** (11), 4319-4325.

FUCHS M., TANNER C. R., 1967. Evaporation from a drying soil. *J. Appl. Meteor.*, **6**, 852-857.

IWAKIRI S., 1968. On the evaporation from the soil surface in the southern part of Kyushu. *J. Agric. Meteor.*, **23** (4), 151-158.

MONTEITH J. L., 1965. Evaporation and environment. In : *The state and movement of water in living organisms*, Symposia of the Soc. for Exper. Biol., XIX, 205-234, University Press, Cambridge.

PHILIP J. R., 1957. Evaporation, and moisture, and heat fields in the soil. *J. Meteor.*, **14**, 354-366.

PERRIER A., 1973. Bilan hydrique de l'assolement blé-jachère et évaporation d'un sol nu en région semi-aride. In : *Réponse des plantes aux facteurs climatiques*, Actes Coll. UNESCO, Uppsala (Suède), 1970, UNESCO, Écologie et Conservation, **5**, 477-487.

TANNER C. B., PELTON W. L., 1960. Potential evapotranspiration estimated by the approximative energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3391-3413.

VAN BAVEL C. H. M., 1966. Potential evaporation : the combination concept and its experimental verification. *Water Res. Res.*, **2** (3), 455-467.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 125-137.

ÉVALUATION DE LA POUSSÉE RADICULAIRE. CONFRONTATION DES RÉSULTATS AVEC LES DONNÉES DE LA THÉORIE OSMOTIQUE. CALCUL DE LA CONDUCTIVITÉ DE LA RACINE POUR L'EAU

J. MORIZET et M. ROBELIN
avec la collaboration technique de Lucette Le Blévenec et H. Raynaud

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
63100 Clermont-Ferrand

RÉSUMÉ

En utilisant une technique de mesure déjà décrite, assortie d'une correction des données expérimentales brutes, les auteurs obtiennent des valeurs de la poussée radiculaire liées linéairement aux différences de pressions osmotiques existant entre le milieu extérieur et l'exsudat, mais systématiquement plus faibles que celles-ci.

Plusieurs hypothèses explicatives sont proposées pour rendre compte des divergences observées, notamment l'existence d'une voie libre.

Enfin, une méthode d'appréciation de la conductivité racinaire à l'égard de l'eau est exposée. Elle utilise les données fournies par les mesures de débit d'exsudation et de poussée radiculaire.

INTRODUCTION

L'énergie nécessaire à l'absorption de l'eau par la plante peut être fournie par deux processus distincts :

— dans le premier, correspondant à l'absorption dite « passive », le rayonnement solaire assure le maintien d'un gradient de potentiel hydrique entre les surfaces de transpiration et celles d'absorption, la plante n'ayant alors qu'un rôle conducteur dans le transfert qui s'établit ;

— le deuxième processus fait appel, pour une absorption dite « active », à l'énergie stockée dans la plante sous forme chimique, le métabolisme libérant cette énergie pour l'absorption de l'eau.

Actuellement, la majorité des auteurs pense que l'énergie métabolique, considérée à ce niveau, intervient surtout dans l'absorption des sels à contre gradient de concentration, l'absorption de l'eau bénéficiant simplement, de façon indirecte, de cette dépense d'énergie métabolique grâce à la différence de pressions osmotiques ainsi créée.

Chez la plante entière, normalement soumise au pouvoir évaporant extérieur, les deux processus coexistent. Avec une plante décapitée, les débits d'exsudation et les pressions d'écoulement de la sève brute (ou poussées radiculaires) peuvent être comparés directement aux différences de pressions osmotiques entre solution extérieure et exsudat.

Ainsi, dans une étude antérieure (MORIZET, 1972 ; MORIZET et ROBELIN, 1972), après avoir proposé une méthode de mesure de la poussée radiculaire responsable du débit d'exsudation presque simultanément contrôlé, nous avions été amenés à admettre l'égalité entre différence osmotique et poussée, confirmant ainsi, de façon directe, la théorie osmotique de l'absorption « active ».

Cependant, en poursuivant ce travail, nous nous sommes rendus compte que notre méthode de mesure entraînait une surestimation non négligeable de la poussée, qui, en fait, est systématiquement inférieure à la différence de pressions osmotiques.

Cette observation ne remet pas en cause notre conclusion, rejoignant celle de nombreux auteurs, sur l'importance du mécanisme osmotique de l'absorption « active » ; elle mérite néanmoins une tentative d'explication que nous esquisserons ici, après avoir décrit les précautions qui nous paraissent maintenant indispensables à observer dans la détermination des poussées radiculaires.

I. — MÉTHODE UTILISÉE

1. — *Rappels*

La technique de mesure est identique à celle décrite en détails dans une publication antérieure (MORIZET et ROBELIN, 1972). Pour cette raison, nous nous contenterons ici de la rappeler brièvement.

Des tomates sont cultivées sur solution nutritive recyclée. Après 7 à 11 semaines de culture, elles sont transportées en chambre de végétation à atmosphère contrôlée ($t = 21° \pm 0{,}5°C$) où sont effectuées les mesures. Les plantes sont décapitées, puis l'exsudat est recueilli par l'intermédiaire d'une connexion souple et étanche dans un tube capillaire. Sans contre-pression, le niveau de la sève s'élève rapidement dans le tube ; la mesure de la vitesse d'ascension permet d'évaluer le débit. Si une contre-pression convenable est exercée sur le liquide, le niveau se stabilise et l'on peut admettre, en première approximation, que la poussée radiculaire correspond à cette poussée d'équilibre.

Cependant, nous avons vu (MORIZET et ROBELIN, 1972) que cet équilibre est temporaire et que la stabilisation prolongée du niveau de la sève exige une augmentation progressive de la contre-pression (fig. 1). Ce phénomène s'explique par la persistance de l'absorption saline alors que l'absorption hydrique est nulle, tout au moins pendant un certain temps, ce qui a pour effet d'augmenter les forces osmotiques mises en jeu dans la poussée radiculaire.

Pour éviter cet inconvénient, la détermination doit être conduite aussi rapidement que possible ; la meilleure façon d'opérer semble la suivante : on applique initialement une contre-pression supérieure à la poussée radiculaire ; le niveau de la sève descend dans le capillaire, ce qui indique sans doute un efflux au niveau des racines. Puis, la contre-pression est progressivement diminuée jusqu'à stabilisation du niveau de la sève. La mesure effectuée selon cette méthode prend rarement plus de 30 secondes et nous avons indiqué que, dans ce cas, la surestimation due à la durée de la mesure pouvait être de l'ordre de 50 mbars. Nous pensions alors que la source d'erreur par excès était due uniquement à la non instantanéité des mesures. Ce risque est d'ailleurs

bien mis en évidence par l'évolution des pressions d'équilibre au cours du temps (fig. 1). Les courbes obtenues présentent généralement une partie initiale à peu près linéaire, ce qui nous avait incité à effectuer une extrapolation graphique pour en déduire la valeur de la poussée radiculaire au temps $t = 0$.

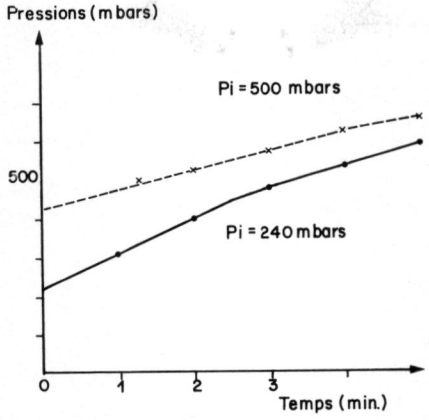


FIG. 1. — *Élévation de la poussée radiculaire après arrêt de l'écoulement pour deux pressions initiales* P_i

2. — *Erreur systématique et sa correction*

Cependant, cette correction ne tenait pas compte d'une erreur systématique, liée à l'incidence du reflux initial de la sève sur la poussée radiculaire. Ce reflux initial nécessaire comme nous l'avons vu, pour une recherche suffisamment rapide de l'équilibre, s'il est toujours présent, n'a pas une valeur constante et dépend du choix de la surpression initiale utilisée, choix qui lui-même est fonction du niveau présumé de la pression d'équilibre. La figure 1 montre un exemple de l'influence de pressions initiales très différentes (500 mbars et 240 mbars) sur l'évolution au cours du temps des pressions d'équilibre. Si maintenant on considère les pressions permettant un équilibre rapide des poussées (cf. I_1), on observe qu'elles croissent de façon sensiblement linéaire avec les pressions initiales appliquées (fig. 2) : nous nous appuyons sur cette régression pour évaluer la poussée radiculaire réelle en admettant qu'elle est représentée par l'ordonnée du point d'intersection de cette droite avec la bissectrice de l'angle des axes ; en effet, en ce point, la pression initiale coïncide

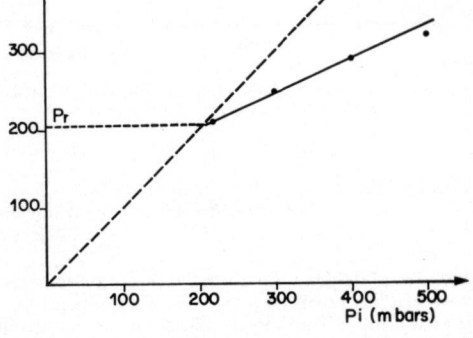


FIG. 2. — *Détermination de la poussée radiculaire réelle* P_r *à partir des couples : pression initiale* P_i*, pression d'équilibre* P_e
((*b*) : bissectrice de l'angle des axes)

avec la pression d'équilibre ; il ne doit donc pas y avoir de reflux de la sève (si on néglige le reflux très bref dû à la dilatation des vaisseaux dont nous reparlerons plus tard) et la contre-pression initiale appliquée stabilise immédiatement le niveau de la sève.

Il serait ainsi nécessaire, pour évaluer la poussée radiculaire réelle (P_r) d'une plante en exsudation libre, de déterminer les pressions d'équilibre (P_e) correspondant à plusieurs contre-pressions initiales (P_i).

On peut cependant, dans une certaine mesure, échapper à cette contrainte.

En effet, l'expérience montre que la pente $a = \dfrac{P_e - P_r}{P_i - P_r}$ qui caractérise la corrélation entre pression d'équilibre et pression initiale (fig. 2), est sensiblement constante pour les mesures effectuées sur les différentes plantes d'une même série. Ceci implique que le rapport $\dfrac{P_e - P_r}{P_i - P_e}$ est lui-même relativement constant et égal à $\dfrac{a}{1 - a}$.

En effet :

$$\frac{1}{a} = \frac{P_i - P_r}{P_e - P_r}; \qquad \frac{1}{a} - 1 = \frac{1 - a}{a} = \frac{P_i - P_e}{P_e - P_r}$$

D'où

$$\frac{P_e - P_r}{P_i - P_e} = \frac{1 - a}{a}$$

On peut donc admettre que la différence entre la poussée d'équilibre et la poussée réelle, ou erreur d'appréciation, est proportionnelle à la différence entre la poussée initiale et la poussée d'équilibre. Ceci est bien illustré par les données expérimentales de la figure. 3.

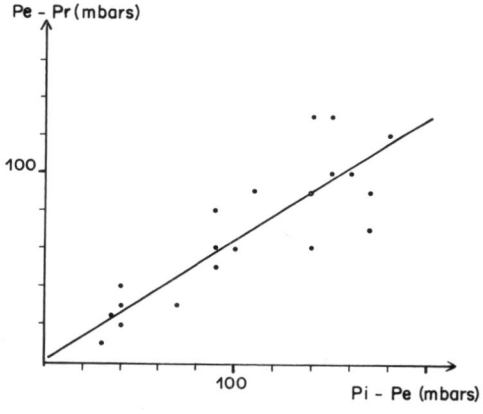


FIG. 3. — *Erreur commise* ($P_e - P_r$) *en fonction de la différence : pression initiale — pression d'équilibre* ($P_i - P_e$)

Ainsi, à partir de quelques déterminations de la poussée réelle P_r par la méthode graphique (fig. 2), on peut calculer les valeurs de P_r de toutes les plantes d'une même série. Il suffit pour cela d'avoir pour chacune une seule mesure de la poussée d'équilibre. Cette estimation introduit un indéterminé de $\pm$ 50 mbars.

Par rapport aux valeurs des poussées radiculaires que nous prenions, auparavant, égales aux pressions d'équilibre, des corrections parfois importantes, sont nécessaires. Pour donner un exemple, il pouvait arriver que la pression initiale appliquée dépassait de 200 mbars la pression d'équilibre mesurée. En moyenne, cette différence entraîne une correction du même ordre de grandeur ; c'est-à-dire que, dans ce cas, la poussée réelle était d'environ 200 mbars inférieure à la valeur auparavant proposée.

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. — *Comparaison entre les poussées radiculaires et les différences de pressions osmotiques de la sève et de la solution nutritive*

Avant de procéder aux corrections que nous venons de décrire, nous avions cru pouvoir avancer qu'il existait une identité entre les valeurs de la poussée radiculaire P et les différences de pressions osmotiques de la sève π_s et de la solution nutritive π_e. Cette observation confirmait d'une façon directe, la théorie osmotique de l'absorption hydrique dite « active ». Toutes corrections effectuées, il n'en est évidemment plus ainsi et s'il existe toujours une relation linéaire d'ajustement (fig. 4), les poussées radiculaires sont systématiquement plus faibles que les différences de pressions osmotiques : $P < \pi_s - \pi_e$.

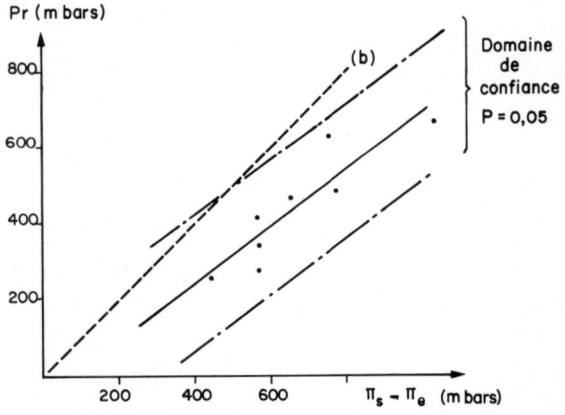


FIG. 4. — *Comparaison entre poussées radiculaires* (P_r) *et différences de pressions osmotiques* ($\pi_s - \pi_e$)
((*b*) : bissectrice de l'angle des axes)

2. — *Essai de schémas explicatifs des différences observées*

Ces résultats ne mettent cependant pas la théorie osmotique en échec puisque la seule composante osmotique (cause présumée) reste suffisante pour expliquer la poussée. Cependant comment expliquer ces divergences systématiques ?

a) *Différences pouvant s'expliquer par la variation volumique du système sous l'effet des pressions.*

Quand l'exsudation de la sève est contrariée par l'application d'une contre-pression, des variations volumiques se produisent dans le système conducteur de la plante, et à un débit nul observé dans le capillaire, peut correspondre un flux non nul au niveau des surfaces d'absorption. Ceci entraînerait une erreur systématique des

valeurs de la poussée radiculaire. Cependant, il semble bien que l'importance de cette erreur soit faible, comme il ressort des comparaisons établies entre les valeurs de la poussée radiculaire déterminée comme précédemment et celles obtenues par la méthode indirecte suivante :

Si l'on applique une pression déterminée et constante dans le temps, le niveau de la sève baisse dans le capillaire puis se stabilise un bref instant avant de reprendre son ascension. Si cette pression appliquée est faible, le reflux est de courte durée, traduisant semble-t-il uniquement les qualités d'élasticité du système ; par contre, à partir d'une certaine pression, le reflux se prolonge et le temps pour obtenir la stabilisation du niveau de la sève augmente brusquement (fig. 5). Cette discontinuité traduit l'apparition d'un phénomène nouveau — très probablement un efflux hydrique au niveau de la racine. La pression correspondant à ce point singulier coïncide avec la valeur de la poussée radiculaire déterminée par ailleurs : 205 mbars (fig. 2 et 5).

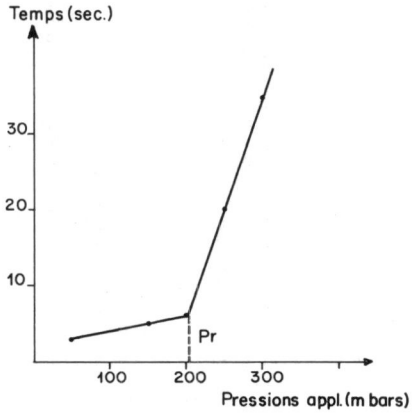


FIG. 5. — *Temps pour obtenir la stabilisation du niveau de la sève*

Or la dynamique des déformations sous l'action des pressions est nécessairement différente dans chacun des cas ; lors de la détermination habituelle, la mesure est effectuée en cours de diminution des pressions (recherche de la pression d'équilibre à partir d'une pression initiale supérieure), alors que dans l'expérience qui vient d'être décrite, la pression appliquée est maintenue constante. Le fait que nous obtenions les mêmes résultats, nous indique que l'erreur liée aux variations volumiques est négligeable.

Il nous faut donc trouver une autre explication.

b) *Différences imputables à d'autres phénomènes.*

Si nous admettons, à la suite des observations que nous avons faites sur l'absorption « active », un concept purement physique du transfert, nous pouvons expliciter les débits en fonction des potentiels et des conductivités dans la racine. Nous verrons ultérieurement que cette démarche sera utile pour une meilleure compréhension du sens à donner aux conductivités racinaires calculées.

Nous admettrons un schéma de circulation radiale de l'eau dans les racines qui

recouvre les plus larges possibilités et qui est conforme aux opinions émises par de nombreux chercheurs (fig. 6).

Ce schéma comporte deux voies :

1. Une voie sélective (à l'égard des solutés) où s'exercent à la fois les forces hydrostatiques et osmotiques. La barrière hémiperméable est constituée par les membranes cytoplasmiques des cellules traversées par le flux hydrique. Nous ne ferons pas d'hypothèse sur la localisation de celle-ci d'autant plus que des controverses existent encore à ce sujet.

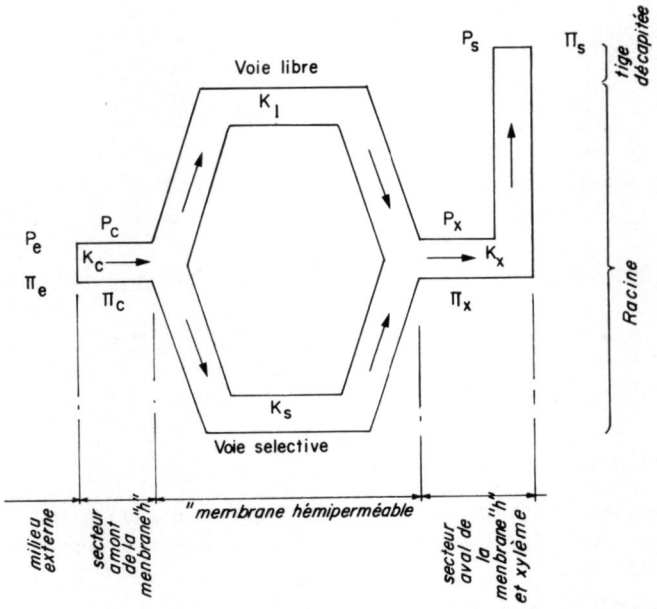


FIG. 6. — *Schéma de la circulation radiale de l'eau dans la racine*

P_e : Pression hydrostatique de la solution nutritive
P_c : Pression hydrostatique à l'amont de la « membrane hémiperméable »
P_x : Pression hydrostatique à l'aval de la « membrane hémiperméable »
P_s : Pression hydrostatique à la sortie de la sève
π_e : Pression osmotique de la solution nutritive
π_c : Pression osmotique de la sève à l'amont de la membrane hémiperméable
π_x : Pression osmotique de la sève à l'aval de la membrane hémiperméable
π_s : Pression osmotique de l'exsudat.
K_c : Conductivité du secteur amont de la « membrane hémiperméable »
K_s : Conductivité de la voie sélective au niveau de la « membrane hémiperméable »
K_l : Conductivité de la voie libre au niveau de la « membrane hémiperméable »
K_x : Conductivité du xylème.
σ_x : Coefficient de sélectivité de la « barrière hémiperméable » dans le sens de l'influx
σ_e : Coefficient de sélectivité de la « barrière hémiperméable » dans le sens de l'efflux

2. Une voie libre ou de « massflow » ou encore extracellulaire.

En admettant que le flux hydrique soit conservatif dans les trois secteurs suivants de la racine (fig. 6) :

— secteur amont de la « membrane hémiperméable »,

— « membrane hémiperméable »,

— secteur aval de la « membrane hémiperméable » et xylème,

nous pouvons écrire :

$$D = k_c(P_e - P_c) = k_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c + P_c - P_x) + k_l(P_c - P_x)$$
$$= k_x(P_x - P_s) \quad (1)$$

La signification de tous ces symboles est indiquée sur la figure 6.

On démontre que l'équation (1) conduit à (2) :

$$D = K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c + P_e - P_s) + K_l(P_e - P_s) \quad (2)$$

avec

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{k_s} + \left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_x}\right)\left(1 + \frac{k_l}{k_s}\right) \quad (3)$$

et

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_l} + \left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_x}\right)\left(1 + \frac{k_s}{k_l}\right) \quad (4)$$

Dans nos expériences, $P_e \simeq 0$; la formule (2) devient :

$$D = K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c - P_s) - K_lP_s \quad (5)$$

Lors des déterminations des poussées réelles P, le débit global est nul :

$$D = 0 = K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c - P) - K_lP \quad (6)$$

D'où l'on tire la valeur de P :

$$P = \frac{K_s}{K_s + K_l}(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c) \quad (7)$$

Pour expliquer l'inégalité $P < \pi_s - \pi_e$ expérimentalement mise en évidence, trois hypothèses tirées de (7) sont possibles et non exclusives l'une de l'autre :

1re hypothèse : $\sigma_x < \sigma_c \leqslant 1$.

Hémiperméabilité imparfaite des membranes sélectives.

Rappelons d'abord que ces coefficients de sélectivité caractérisent le degré d'hémiperméabilité d'une membrane et l'interaction entre les mouvements du solvant et du soluté.

Si $\sigma = 1$, la membrane est physiquement imperméable au soluté (hémiperméabilité parfaite). A l'opposé, $\sigma = 0$ traduit sa perméabilité totale. Les mesures de ces coefficients sont encore peu nombreuses parce que délicates. Parmi celles-ci, nous citerons celles de SLATYER (1966) qui indique comme valeurs du coefficient de sélectivité pour le flux d'entrée : 0,7 à 0,9 pour le mannitol. Cependant, nous prendrons particulièrement en considération les résultats plus récents des travaux de GINSBURG et GINZBURG (1970). Ces auteurs travaillant sur des manchons corticaux de segments de racines de maïs, ont pu déterminer avec précision, les coefficients σ (influx et efflux) du saccharose, de l'urée, de Cl^- et de Na^+. Dans tous les cas, et plus particulièrement pour les ions chlore et sodium, ils sont très proches de l'unité. Si l'on se refère à ces résultats, l'hémiperméabilité serait presque parfaite, d'où σ_x et $\sigma_c \neq 1$, et il faudrait chercher ailleurs la cause des écarts observés entre les poussées radiculaires et les différences de pressions osmotiques.

2e hypothèse : $\pi_x - \pi_c < \pi_s - \pi_e$.

Pressions osmotiques aux bornes de la barrière hémiperméable, différentes des pressions osmotiques de l'exsudat et de la solution nutritive.

Il a été souvent admis que la différence entre la pression osmotique de la sève (π_s) et celle de la solution nutritive (π_e) reflète exactement celle qui existe entre les bornes de la voie sélective ($\pi_x - \pi_c$). Un certain nombre de chercheurs se sont élevés contre ces hypothèses en insistant notamment sur l'inégalité $\pi_s \neq \pi_x$. Par exemple, un régime permanent de la concentration de la sève est très long à atteindre si un facteur du milieu a été modifié auparavant (HODGES et VAADIA 1964 *a*, 1964 *b* ; RANEY et VAADIA, 1965). En outre, STEWARD *et al.* (1942) ont montré que les sels accumulés dans les vacuoles, en condition d'alimentation minérale satisfaisante, pouvaient être remis en circulation lors d'une carence. Ce phénomène explique d'ailleurs la persistance d'une certaine charge minérale des sèves de plantes placées sur eau pure.

Travaillant sur le maïs, KLEPPER (1967) a trouvé que la pression osmotique de l'exsudat (π_s) est inférieure à celle de la sève dans la région absorbante (π_x) ; MEIRI et ANDERSON (1970) arrivent à des conclusions inverses.

Dans nos conditions expérimentales, il est impossible de préciser le sens de l'erreur éventuellement commise en faisant l'approximation :

$$\pi_s - \pi_e = \pi_x - \pi_c$$

3e hypothèse : $\dfrac{K_s}{K_s + K_l} < 1$ ou $K_l \neq 0$.

Existence d'une voie libre.

Cette dernière hypothèse semble beaucoup mieux vérifiée par les résultats des différents chercheurs, notamment ceux de MEES et WEATHERLEY (1957) ; la discussion s'établit essentiellement sur l'importance relative de cette voie. Si l'on admet son existence, elle implique des « fuites » dès la mise en pression lors de la mesure de la poussée radiculaire. Quand la contre-pression d'équilibre est appliquée, le flux net d'absorption hydrique est bien nul, mais il résulte d'un flux « sélectif » D_s positif et d'un flux « libre » D_l négatif, égaux en valeur absolue mais de sens opposés.

En ne retenant que cette hypothèse explicative, l'équation (7) s'écrit :

$$P = \frac{K_s}{K_s + K_l}(\pi_s - \pi_e) \qquad (7')$$

D'où

$$\frac{\pi_s - \pi_e}{P} = \frac{K_s + K_l}{K_s} \qquad (8)$$

En nous reportant à la figure 4, les valeurs de ce rapport calculées à partir de la droite de régression sont de :

1,48 pour $\pi_s - \pi_e = 800$ mbars et $P_r = 540$ mbars

et 1,56 pour $\pi_s - \pi_e = 500$ mbars et $P_r = 320$ mbars

La valeur moyenne approximative de 1,5 est un peu plus élevée que celle déterminée par MEES et WEATHERLEY (1957) qui était de 1,3.

3. — *Calcul de la conductivité racinaire à partir du débit d'exsudation et de la poussée radiculaire*

La connaissance des valeurs de la poussée radiculaire (déterminées avec les précautions indiquées) et du débit d'exsudation permet de calculer la conductivité globale du système racinaire.

En effet, la combinaison des équations caractérisant :

— d'une part l'exsudation sans contre-pression :

$$D = K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c) \tag{5'}$$

— d'autre part l'arrêt de l'exsudation par la contre-pression d'équilibre P :

$$K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c - P) - K_l P = 0 \tag{6}$$

conduit à la valeur :

$$K_s + K_l = K = \frac{D}{P} \tag{9}$$

Alors que la conductivité racinaire d'une plante en exsudation est K_s (5'), K a la signification de la conductivité racinaire d'une plante soumise à un flux transpiratoire intense.

En effet, quand il en est ainsi, dans l'expression générale de D :

$$D = (K_s + K_l)(P_e - P_s) + K_s(\sigma_x\pi_x - \sigma_c\pi_c) \tag{2'}$$

le deuxième terme (absorption « active ») devient négligeable devant le premier (absorption « passive »).

Donc :

$$D \neq (K_s + K_l)(P_e - P_s) = K(P_e - P_s) \tag{10}$$

On sait que K varie en fonction de la demande climatique (STOCKER et WEATHERLEY, 1971).

La conductivité K mesurée à partir de la poussée radiculaire et du débit d'exsudation, ne peut donc s'identifier exactement à la conductivité racinaire d'une plante entière en condition de flux normal.

Cependant, les facteurs d'action agissant sur la valeur de K auront vraisemblablement une répercussion de même sens sur la conductivité racinaire en toutes conditions.

Dans une prochaine publication, nous présenterons des résultats concernant l'action de différents facteurs du milieu sur la conductivité racinaire à l'égard de l'eau.

Mais, pour donner dès à présent un exemple des valeurs des conductivités obtenues, nous indiquons (tabl. 1) les résultats recueillis à partir d'une plante de tomate, au cours de la journée, après le sectionnement. Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que ceux cités par BOYER (1971) et obtenus par une méthode tout à fait différente.

TABLEAU I

Conductivités racinaires globales K calculées à partir des débits d'exsudation et des poussées radiculaires

Horaires des mesures	Débits (1) (cm sec^{-1})	Poussées radiculaires (bar)	Conductivités racinaires globales K (cm sec^{-1} bar^{-1})
Sectionnement des plantes entre 7 h et 8 h			
9 h 00	$0{,}77 \times 10^{-6}$	0,81	$0{,}95 \times 10^{-6}$
10 h 22	0,90 —	0,73	1,23 —
11 h 35	1,06 —	0,66	1,61 —
13 h 25	0,93 —	0,57	1,63 —
16 h 00	0,56 —	0,50	1,12 —

(1) Les débits sont rapportés à la surface foliaire et sont exprimés en cm^3 cm^{-2} sec^{-1} ou cm sec^{-1}.

CONCLUSION

La méthode de détermination de la poussée radiculaire décrite dans ce mémoire, permet d'obtenir des valeurs perturbées, au minimum, par la mesure elle-même.

Cette façon de procéder conduit à des estimations sur plante coupée dépassant rarement une atmosphère alors que des chiffres de dix atmosphères ont été avancés par certains auteurs procédant par arrêt prolongé de l'écoulement.

Les valeurs fournies par cette nouvelle technique, sont certainement beaucoup plus proches de la réalité dans le cas de plantes entières placées en condition de transpiration intense (aucune contre-pression, débit élevé). Néanmoins, la logique conduit à penser qu'en condition de flux transpiratoire très faible, de nuit en particulier, avec le développement d'une contre-pression interne pouvant devenir importante, la poussée radiculaire est susceptible de s'élever de façon notable.

Reçu pour publication en février 1975.

SUMMARY

ESTIMATE OF ROOT PRESSURE.
COMPARISON OF THE RESULTS WITH THE OSMOTIC THEORY DATA.
CALCULATION OF THE ROOTS' WATER CONDUCTIVITY

The data provided by a previously described method of root pressure measurement are corrected in order to take into account the disturbing effect of the initial high pressure applied. There is a satisfactory linear relation that connects the differences between the osmotic pressures of the exudate and those of the nutritive solution on the one hand and the corrected root pressures on the other hand. But the latter are systematically lower. Various explanations are described to

account for this. The least arguable seems to be the existence of mass flow pathway in the root, through which leaks may occur immediately pressure is applied.

Finally, a method of calculating the roots' water conductivity is presented. It uses the data supplied by the measurements of exudation rates and root pressures.

ZUSAMMENFASSUNG

SCHÄTZUNG DES WURZELDRUCKES.
GEGENÜBERSTELLUNG DER RESULTATE ZUR OSMOSE-THEORIE.
BERECHNUNG DER WASSERLEITUNG IN DEN WURZELN

Die Angaben, die durch eine Methode zur Messung des Wurzeldrucks, die früher beschrieben wurde, erhalten worden sind, werden korrigiert, um auf den Störeffekt des anfänglich angewendeten Ueberdrucks Rücksicht zu nehmen. Es existiert eine befriedigende lineare Beziehung, die die Unterschiede zwischen dem osmotischen Druck der Blutung und der Nährlösung einerseits und dem korrigierten Wurzeldruck anderseits verbindet. Dieser jedoch ist durchwegs niedriger. Verschiedene Erklärungen werden herangezogen, um dem Rechnung zu tragen. Die am wenigsten anfechtbare Erklärung scheint diejenige zu sein, dass in der Wurzel freie Bahnen existieren durch die Auslaufen statt-finden könnten, sobald die Wurzel unter Druck gesetzt wird.

Schliesslich wird eine Methode zur Berechnung der Wasserleitung in der Wurzel vorgelegt. Sie verwendet die Angaben, die durch die Messung von Blutungsmengen und vom Wurzeldruck gewonnen wurden.

РЕЗЮМЕ

Оценка корешкового давления : сравнение результатов с данными осмотической теории; рассчет водопроводимости корней.

Ж. МОРИЗЕ, М. РОБЕЛЕН.

Данные, полученные при помощи ранее описанного метода измерения корешкового давления, исправляются для принятия во внимание вихревого эффекта начально приложенного свех-давления.

Существует удовлетворительное линейное соотношение связывающее разницу между осмотическими давлениями эксудата и питательного раствора с одной стороны, и исправленными корешковыми давлениями — с другой. Но эти последние систематически более слабы. Даются разные об'яснения этого явления. Наименее спорным из об'яснений является по всей вероятности существование в корне свободных путей, по которым и происходит утечка с момента начала давления.

И, наконец, представляется метод рассчета водопрозодимости корней с применением данных измерения расхода экссудации и корешковых давлений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOYER J. S., 1971. Resistances to water transport in soybean, bean, and sunflower. *Crop Sci.*, 11, 402-407.

BROUWER R., 1953. Water absorption by the roots of « Vicia faba » at various transpiration strenghts. I. Analysis of the uptake and the factors determining it. *Proc. Kon Nederl. Akad. Wetensch.*, C., **56**, 106-115. II. Causal relation between suction tension, resistance and uptake. *Idem*, C., **56**, 129-136. III. Changes in water conductivity artificially obtained. *Idem*, 1954. C., **57**, 68-80.

GINSBURG H., GINZBURG B. Z., 1970. Radial water and solute flows in roots of *Zea mays*. I. Water flow. *J. Exp. Bot.*, **21**, 580-592. II. Effect of temperature on THO and ion transport. *J. Exp. Bot.*, **22**, 337-341.

HODGES T. K., VAADIA Y., 1964 *a*. Uptake and transport of radiochloride and tritiaded water by various zones of onion roots of different chloride status. *Pl. Physiol. Lancaster*, **39**, 104-108.

HODGES T. K., VAADIA Y., 1964 *b*. Chloride uptake and transport in roots of different salt status. *Pl. Physiol. Lancaster*, **39**, 109-114.

KLEPPER B., 1967. Effects of osmotic pressure on exudation from corn roots. *Aust. J. Biol. Sci.*, **20**, 723-735.

MEES G. C., WEATHERLEY P. E., 1957. The mechanism of water absorption by roots. I. Preliminary studies on the effects of hydrostatic pressure gradients. *Proc. Roy. Soc.*, B., **147**, 367-380. II. The role of hydrostatic pressure gradients across the cortex. *Idem*, B., **147**, 381-391.

MEIRI A., ANDERSON W. P., 1970. Observations on the exchange of salt between the xylem and neighbouring cells in Zea mays primary roots. *J. exp. Bot.*, **21**, 908-914.

MORIZET J., 1972. Étude expérimentale de l'absorption hydrique par les plantes. Mécanismes osmotiques de la poussée radiculaire. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, Série D, **275**, 1773-1775.

MORIZET, J. ROBELIN M., 1972. La poussée radiculaire. Déterminations, mécanisme, implications. *Ann. agron.*, **23**, 479-496.

RANEY F., VAADIA Y., 1965. Dispersion of THO and ^{36}Cl uptake by sunflower root systems. *Phys. Pl.*, **18**, 8-14.

SLATYER R. O., 1966. An underlying cause of measurement discrepancies in determinations of osmotic characteristics in plant cells and tissus. *Protoplasma*, **62**, 34-43.

STEWARD F. C., PRÉVOST P., HARRISON J. A., 1942. Absorption and accumulation of rubidium bromide by barley plants. Localisation in the root of cation accumulation and of transfert to the shoot. *Pl. Physiol.*, **17**, 411.

STOKER R., WEATHERLEY P. E., 1971. The influence of the root system on the relationship between the rate of transpiration and the depression of leaf water potential. *New Phytol.*, **70**, 547-554.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 139-157.

ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMAT D'UN CHAMP DE MAÏS

VI. — Étude de la température de la surface du sol sous culture

A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Les équations classiques de transfert présentées et réduites sous la forme d'une équation donnant l'enthalpie de l'air permettent d'aborder plus simplement l'état d'équilibre au niveau d'un sol sous végétation. Une étude de la température de surface du sol humide ou sec sous végétation est donc réalisée sous cette forme et confrontée à l'expérience. Un modèle de calcul et de prévision est fourni et discuté ; puis une brève analyse du rôle des différents facteurs climatiques et du rôle de la structure du couvert sur la valeur de la température de surface est effectuée en vue de souligner les possibilités de prédiction du modèle.

INTRODUCTION

La prévision de la répartition des énergies au sein de la végétation en fonction de la structure du couvert et des caractéristiques climatiques est un des buts poursuivis depuis quelques années. L'analyse de la répartition des énergies est indispensable pour comprendre le phytoclimat d'une culture, en particulier la consommation en eau et l'assimilation photosynthétique d'une culture (Chartier *et al.*, 1971). Certes, une telle approche suppose la construction d'un modèle synthétique des échanges de masse et d'énergie (Philip, 1964), mais elle nécessite aussi de poursuivre des études plus ou moins fines permettant une meilleure connaissance de tel ou tel secteur, soit de la physique, soit de la biologie des échanges au sein du système plante-atmosphère. Par exemple, l'absorption de quantité de mouvement au niveau du feuillage et la régulation stomatique ne sont pas suffisamment connus et constituent des points d'achoppement des essais de modèle général (Cowan, 1971 ; Schawcroft et Lemon, 1971 ; Thom, 1972). Cependant, l'état actuel de la modéli-

sation des échanges au sein d'un couvert permet de déterminer, avec une approximation satisfaisante, compte tenu de la structure du couvert, le bilan d'énergie à la surface du sol et en particulier la température à ce niveau. Cette température n'est généralement pas constante en tout point de la surface, principalement lorsque le soleil est au voisinage du zénith et que les taches de soleil à la surface du sol sont nombreuses (ALLEN et LEMON, 1972) ; toutefois, leur répartition et leur déplacement au cours du temps, permettent une certaine homogénéisation ; la température moyenne de la surface du sol sous couvert recouvre donc une certaine réalité dont le rôle est important à maints égards (germination et croissance des mauvaises herbes, évaporation à la surface du sol, flux énergétique participant au réchauffement ou au refroidissement journalier...).

LISTE DES SYMBOLES

a_1, a_2, a_3	Coefficients
C_a	Concentration en vapeur d'eau de l'air au niveau de référence z_R
C_z	Concentration en vapeur d'eau de l'air au niveau z
c_p	Chaleur massique de l'air
D	Hauteur de déplacement du plan de référence (profil aérodynamique)
E	Expression proportionnelle au déficit de saturation $\left(\frac{P'}{P' + \gamma}\right)(T_a - T_r)$
e	Coefficient de rétention à la surface du sol ou humidité relative en équilibre avec la surface du sol.
$F(z)$	Surface foliaire cumulée à partir du niveau h
$f(z)$	Densité de surface foliaire
G	Fonction intégrale des diffusivités
$H(z)$	Enthalpie de l'air au niveau z
h	Hauteur du couvert
h_c	Coefficient d'échange convectif entre les niveaux h et z_R
I	Fonction intégrale du rapport entre le rayonnement net et les diffusivités
$J(z)$	Fonction exponentielle d'atténuation ($\exp(-\alpha F(z))$)
$K(z)$	Diffusivité turbulente au niveau z
k	Coefficient de Karmann
L	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
M	Masse molaire de l'eau
P(T)	Pression de vapeur saturante à la température T
P', P'_1, P'_2,	Dérivées de la pression de vapeur saturante respectivement égales à $(P(T_{so}) - P(T_r))/(T_{so} - T_r)$, $(P(T_s) - P(T_{so}))/(T_s - T_{so})$, $(P(T_{so}) - P(T_{rs}))/(T_{so} - T_{rs})$

R	Constante des gaz parfaits
Ra	Rayonnement atmosphérique
Rn	Rayonnement net du couvert
Rn_*	Rayonnement net climatique
R$n(z)$	Rayonnement net au niveau z dans le couvert
Rg	Rayonnement global
T	Température absolue de l'air
T$_a$	Température de l'air au niveau de référence z_R
T(z)	Température de l'air au niveau z
T$_r$	Température du point de rosée de l'air au niveau z_R
T$_r(z)$	Température du point de rosée de l'air au niveau z
T$_{so}$	Température de la surface du sol à saturation
T$_s$	Température de la surface du sol
T$_{rs}$	Température du point de rosée à la surface du sol
U	Vitesse du vent au niveau de référence z_R
u_*	Vitesse de frottement
z	Hauteur
z_R	Hauteur de référence
α, α'	Coefficients
ε	Émissivité du couvert
γ	Constante psychrométrique ($\gamma \sim \frac{\rho c_p}{LM/RT}$)
ρ	Masse volumique
Φ_o	Densité de flux conductif à la surface du sol
Φ_s, $\Phi_s(z)$	Densité de flux de chaleur sensible, pour le couvert et pour un niveau z
Φ_L, $\Phi_L(z)$	Densité de flux de chaleur latente, pour le couvert et pour un niveau z
σ	Constante de Stefan Boltzman
ψ_s	Potentiel hydrique à la surface du sol.

I. — EXPRESSION THÉORIQUE DE LA TEMPÉRATURE DE SURFACE DU SOL

Considérons une végétation de hauteur h dont le bilan d'énergie est donné par par la relation classique :

$$Rn + \Phi_o + \Phi_s + \Phi_L = 0 \qquad (1)$$

Les densités de flux considérées ci-dessus sont des grandeurs positives si elles représentent un gain pour le couvert (tranche de végétation) et inversement.

D'autre part, si T$_a$ et C$_a$ désignent les caractéristiques climatiques de l'air au niveau de référence z_R (situé à 2 ou 3 mètres au-dessus du couvert au sein de la couche limite dynamique) et T(h) et C(h) les mêmes grandeurs au sommet du couvert,

il est possible d'écrire suivant la relation classique du profil logarithmique en conditions de flux conservatif et de neutralité thermique (PERRIER et SEGUIN, 1970) :

$$T(h) - T_a = \frac{-\Phi_s}{\rho c_p h_c} \tag{2}$$

$$C(h) - C_a = \frac{-\Phi_L}{L h_c} \tag{3}$$

$$h_c = 1 \Big/ \int_h^{z_R} \frac{dz}{K(z)} = \frac{k u_*}{\text{Log} \dfrac{z_R - D}{h - D}} \tag{4}$$

Enfin, rappelons les trois relations de base qui régissent les flux au sein du couvert :
— le bilan d'énergie à un niveau z :

$$Rn(z) + \Phi_o + \Phi_s(z) + \Phi_L(z) = 0 \tag{1 bis}$$

$Rn(z)$, $\Phi_s(z)$ et $\Phi_L(z)$ étant les flux au niveau z, avec la même convention que précédemment : flux positifs s'ils représentent un gain pour la tranche de végétation $0 - z$ et inversement;
— Les expressions de flux turbulents de chaleur (Φ_s) et de masse (Φ_L) :

$$\Phi_s(z) = \rho c_p K(z) \frac{\partial T(z)}{\partial z} \tag{5}$$

$$\Phi_L(z) = L K(z) \frac{\partial C(z)}{\partial z} \tag{6}$$

A. — *Expression de l'enthalpie*

A pression totale constante et si l'on néglige la variation d'énergie calorifique de la vapeur d'eau, la différence d'enthalpie entre les masses d'air humide situées à deux niveaux z_1 et z_2 pourra s'écrire :

$$H(z_2) - H(z_1) = [LC(z) + \rho c_p T(z)]_{z_1}^{z_2} \tag{7}$$

En combinant les expressions précédentes (5-6) — comme le firent sous des formes très voisines PHILIP (1964), UCHIJIMA (1966), DENMEAD (1973) — il est possible de faire ressortir l'enthalpie (7) et, compte tenu de la relation 4 valable quelle que soit la côte z, d'écrire :

$$| H(z) |_{z_1}^{z_2} = - \int_{z_1}^{z_2} \frac{Rn(z) + \Phi_o}{K(z)} dz \tag{7 bis}$$

Au dessus du couvert ($z > h$), la combinaison des équations (2) et (3) donnent la valeur de la variation d'enthalpie de l'air qui, entre les niveaux h et z_R, s'écrira :

$$H(z_R) - H(h) = + \frac{\Phi_s + \Phi_L}{k u_*} \text{Log} \frac{z_R - D}{h - D} \tag{8}$$

Par combinaison des relations 7 et 8, on peut déduire la relation générale traduisant l'enthalpie pour tout niveau z compris entre la surface du sol et le niveau de

référence z_R($\Phi_s + \Phi_L$ est remplacé par la valeur équivalente — ($Rn + \Phi_o$) donnée par la relation 1) :

$$H(z) = H(z_R) + \frac{Rn + \Phi_o}{ku_*} \log \frac{z_R - D}{h - D} + \int_{z<h}^{h} \frac{Rn(z) + \Phi_o}{K(z)} dz \qquad (9)$$

Cette relation fournit donc la valeur de l'enthalpie H(0) à la surface du sol sous couvert. Elle se trouve déterminée à partir :

— de la connaissance des grandeurs climatiques de température et de concentration T_a, C_a ou T_r qui déterminent la valeur de $H(z_R)$ et de la vitesse du vent U ;

— de la structure du couvert qui intervient une première fois par l'intermédiaire de la vitesse de frottement u_*, de la hauteur de déplacement D, et les diffusivités $K(z)$ (CIONCO, 1964 ; PERRIER, 1967) ;

— des grandeurs énergétiques $Rn(z)$ et Φ_o ; $Rn(z)$ est très largement dépendant du bilan radiatif Rn de la culture et de la structure du couvert qui intervient ainsi une seconde fois dans H(0) (ANDERSON, 1966 ; IMPENS et LEMEUR, 1969).

B. — *Expression de la température de surface du sol*

Deux cas se présentent :

— le sol est au voisinage de la saturation, on peut écrire alors :

$$T(z = 0) = T_r(z = 0) = T_{so}$$

ce qui entraîne l'expression suivante de l'enthalpie $H_1(0)$ à la surface du sol :

$$H_1(0) = \frac{LM}{RT} P(T_{so}) + \rho c_p T_{so} \qquad (10)$$

Dans ces conditions (relations 9 et 10) et compte tenu de la valeur de $H(z_R)$ égal à $\frac{LM}{MT} P(T_r) + \rho c_p T_a$, il est possible de calculer la température de surface T_{so} à partir de la relation suivante :

$$T_{so} = T_a - \frac{\gamma}{\gamma + P'} \left[\frac{P'}{\gamma} (T_a - T_r) - \frac{Rn + \Phi_o}{\rho c_p h_c} - \frac{1}{\rho c_p} \int_0^h \frac{(Rn(z) + \Phi_o)}{K(z)} dz \right] \qquad (11)$$

— le sol n'est pas à saturation en surface ; il exite donc un certain frein à l'évaporation que l'on caractérisera par un coefficient de rétention, e, ou humidité relative en équilibre avec la surface du sol $\left(e = \frac{P(T_{rs})}{P(T_s)}\right)$ (PERRIER, 1975) où T_s et T_{rs} sont les températures de la surface du sol et la température du point de rosée à la surface du sol.

L'enthalpie de la surface du sol pourra s'écrire, d'après la relation 7 :

$$H_2(0) = \frac{LM}{RT} P(T_{rs}) + \rho c_p T_s \qquad (12)$$

Elle est aussi donnée par la relation 9 qui s'applique aussi bien au cas de saturation qu'au cas présent de non saturation. L'unique différence entre ces

deux états est une légère modification de la valeur de l'enthalpie due à la variation de température de surface du sol qui contribue à modifier légèrement le profil de rayonnement net $Rn(z)$ près de la surface du sol ainsi que la valeur de la densité de flux conductif Φ_o. On pourra donc écrire cette légère modification d'enthalpie ΔH sous la forme :

$$H_2(o) = H_1(o) + \Delta H = \frac{LM}{RT} P(T_{so} + \Delta T_{so}) + \rho c_p (T_{so} + \Delta T_{so}) \qquad (13)$$

$Rn(z)$ étant plus faible près du sol ainsi que Φ_o, la valeur T'_{so} égale à $T_{so} + \Delta T_{so}$ est inférieure à T_{so}.

La comparaison des relations 12 et 13 conduit, si $P(T_{rs})$ est remplacé par sa valeur $e\,P(T_s)$ à :

$$eP(T_s) + \gamma T_s = P(T'_{so}) + \gamma T'_{so}$$

ou encore, en posant $P'_1 = (P(T_s) - P(T'_{so}))/(T_s - T'_{so})$

$$T_s = T'_{so} + P(T'_{so}) \frac{1 - e}{eP'_1 + \gamma} \qquad (14)$$

Si on élimine cette fois T_s au lieu de T_{rs}, le même type de calcul conduit à la valeur de $P(T_{rs})$

$$P(T_{rs}) = P(T'_{so})\, e \frac{P'_1 + \gamma}{e\,P'_1 + \gamma} \qquad (14\ bis)$$

ou encore, en introduisant $P'_2 = (P(T'_{so}) - P(T_{rs}))/(T'_{so} - T_{rs})$

$$T_{rs} = T'_{so} + P(T'_{so}) \frac{\gamma}{P'_2} \frac{e - 1}{eP'_1 + \gamma} \qquad (14\ ter)$$

La température de surface du sol se trouve donc défini par T_{so} dans le cas d'un sol saturé en surface (rel. 11) et dans le cas général d'un potentiel hydrique ψ_s de surface, par T_s (rel. 14). Cette valeur dépend donc d'une part de $T_{so} + \Delta T_{so}$ ou de T'_{so} , et d'autre part de la valeur du coefficient e déterminé par ψ_s $e = \exp\left(\frac{M\psi_s}{RT}\right)$. En première approximation dans la mesure où ΔT_{so} est négligeable, il est aisé de définir à partir de T_{so} et de e, les valeurs des températures de surface et de rosée à la surface du sol. Dans tous les cas, en appliquant les relations 14, 14 *bis* ou 14 *ter* avec la valeur T_{so}, l'erreur commise ΔT_s sur T_s et ΔT_{rs} sur T_{rs} est strictement :

$$\Delta T_s = \Delta T_{so} \frac{P'_1 + \gamma}{eP'_1 + \gamma} \qquad (15)$$

$$\Delta T_{rs} = \Delta T_{so} \frac{P'_1 + \gamma}{eP_1 + \gamma} e \qquad (15\ bis)$$

Au paragraphe suivant, une discussion portera sur la valeur que peut atteindre ΔT_{so} et l'on définira les domaines pour lesquels il pourra être négligé.

II. — VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE ET DOMAINE DE VALIDITÉ

A. — *Vérification du modèle dans le cas d'un sol humide en surface*

La vérification de la relation 11 a été réalisée sous culture de maïs (hybride F 7 × EP 1) à densité un peu au-dessus de la normale pour les conditions de la région parisienne (90 000 pieds par hectare) et sur sol maintenu au voisinage de la capacité au champ par irrigation nocturne quasi journalière. Le couvert était au stade de son plein développement foliaire et correspondait à un indice foliaire d'environ 2,5 (fig. 1).

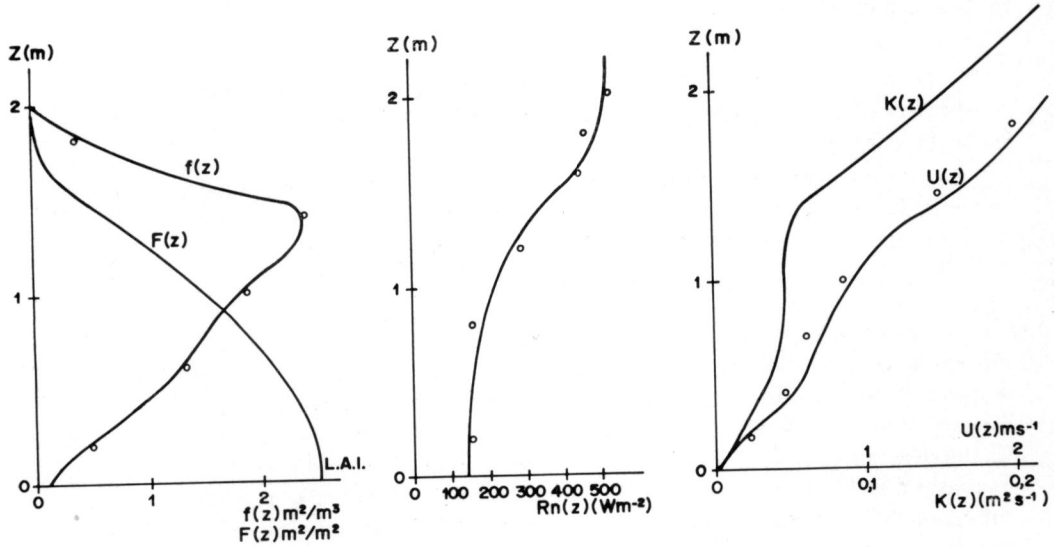


FIG. 1. — *Profil fourni par les différents sous-programmes à partir des cinq valeurs mesurées de densité de surface foliaire, des caractéristiques climatiques* (Rn, *u*) *et de celles du couvert* u_* *et* $d = f(u)$
Les cercles représentent les valeurs expérimentales

La relation 11, compte tenu de la relation 4, peut se mettre sous la forme schématique suivante, où l'on introduit trois nouveaux termes :

$$T_{so} = T_a - E + G + I \qquad (11\ bis)$$

E : proportionnel au déficit de saturation :

$$E = \left(\frac{P'}{P' + \gamma}\right)(T_a - T_r)$$

G : proportionnel à la densité de flux conductif, Φ_o, à la surface du sol, le coefficient de proportionnalité comprenant l'intégrale des inverses des diffusivités :

$$G = \left(\frac{\gamma}{P' + \gamma}\frac{\Phi_o}{\rho c_p}\int_0^{z_R}\frac{dz}{K(z)}\right)$$

I : proportionnel au rayonnement net du couvert, Rn, le coefficient de proportionnalité comprenant l'intégrale du rapport entre la fonction exponentielle d'atténuation de l'énergie radiative nette R$n(z)$ (voir ci-dessous) et de la diffusivité K(z) :

$$I = \left(\frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{Rn}{\rho c_p} \int_0^{z_R} \frac{J(z)}{K(z)}\, dz\right)$$

De ces trois termes, il est difficile d'en négliger un, car si G est toujours inférieur d'un ordre aux deux autres, il ne reste que partiellement négligeable devant la différence (E — I).

Un modèle de calcul a été réalisé pour une culture de maïs à partir des données expérimentales concernant les caractéristiques aérodynamiques et géométriques de la végétation et des données climatiques.

Il comprend essentiellement :

— un sous-programme qui définit, à partir des densités de surfaces foliaires mesurées, la loi de variation de la densité de surface foliaire $f(z)$ et celle de la courbe de surface foliaire cumulée F(z).

— un sous-programme qui calcule le profil de rayonnement net, à partir du rayonnement net Rn, mesuré au-dessus du couvert, et de la surface foliaire cumulée en utilisant une loi expérimentale établie sur maïs de la forme :

$$Rn(z) = Rn\, e^{-\alpha F(z)} \qquad (\text{avec } \alpha = 0{,}62) \qquad (16)$$

— Enfin un sous-programme qui détermine, à partir des données aérodynamiques de la culture donnant u_* et D en fonction de la vitesse du vent (Perrier, 1970), le profil K(z) des diffusivités turbulentes du sommet du couvert à la surface du sol à partir d'un modèle aérodynamique lié à la structure du couvert (Perrier, 1967). Ce modèle suppose un profil logarithmique de la vitesse du vent au-dessus du couvert et dans sa partie supérieure, un profil exponentiel dans la masse de la végétation et, à la base du couvert, un nouveau profil logarithmique dans une zone à densité de surface foliaire très faible ; chacun de ces profils étant déterminé par les conditions extérieures et la structure du couvert, permet de calculer le profil continu des diffusivités K(z).

A titre d'exemple, la figure 1 retrace les profils obtenus par ces différents sous-programmes pour un champ de maïs dont les valeurs de densités de surface foliaire ont été mesurées pour cinq tranches de végétation.

Au cours des journées du 12 et du 16 août 1971, les valeurs des températures de surfaces calculées dans le cas d'une surface de sol humide ont été confrontées avec les valeurs mesurées sous maïs irrigué. Ces mesures de température de surface ont été réalisées par thermocouples disposés à la surface du sol en dix points différents (fig. 2 et 3).

Il est important de noter que si la confrontation entre théorie et expérience n'est pas parfaite, les évolutions sont suffisamment proches pour montrer que les différents modèles introduits permettent de rendre compte d'une certaine réalité des phénomènes ; l'utilisation d'un tel modèle est alors possible pour prévoir le rôle de la structure du couvert et des conditions climatiques sur les caractéristiques microclimatiques du sol. Par rapport à la mesure directe, la sensibilité du modèle

vis-à-vis des fluctuations du rayonnement net (journée du 12 par temps variable), peut s'expliquer en partie par le fait que la mesure de la température ait été effectuée à un ou deux millimètres sous la surface du sol ; en effet, ceci doit sous-estimer les variations de la surface et conduire à une température prise par défaut, ce qui va dans le sens de la sous-estimation (environ 1°C) généralement observée. Il est cependant probable que, principalement au niveau du calcul de la diffusivité $K(z)$, une sous-estimation se soit produite, bien que le profil de vitesse du vent mesuré semble en assez bon accord avec le modèle qui conduit à $K(z)$ (fig. 1).

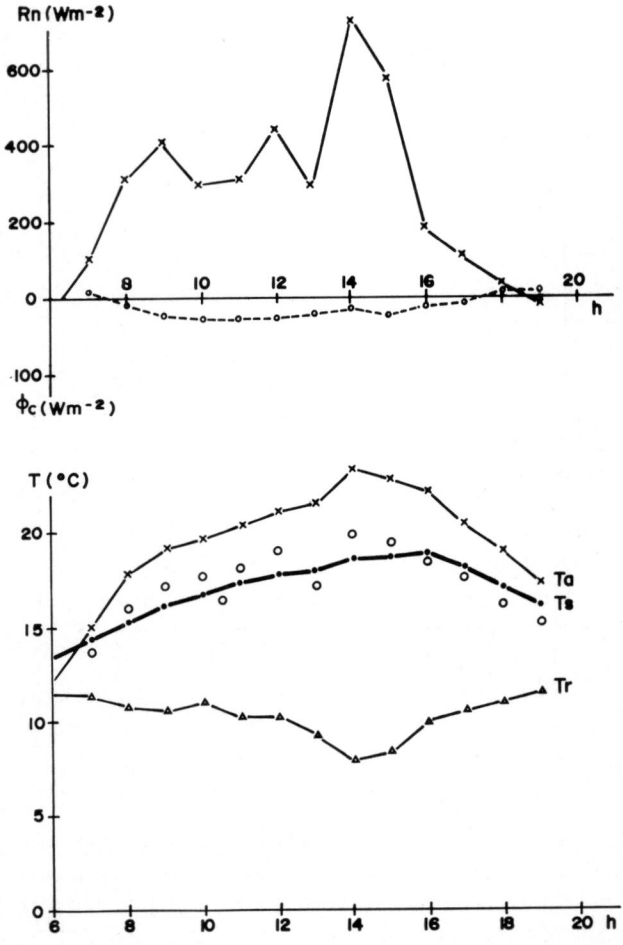


FIG. 2. — *Évolution des caractéristiques climatiques* (Rn, T_a, T_r) *et de la température de surface sous couvert de maïs* (La Minière)
(●) Valeurs mesurées de T_s et (○) valeurs calculées (12-08-71)

En effet, comme il le sera souligné au paragraphe suivant et comme le montre le tableau 1, le modèle est très sensible aux variations de la vitesse du vent et d'autant plus sensible que le rayonnement net est plus grand.

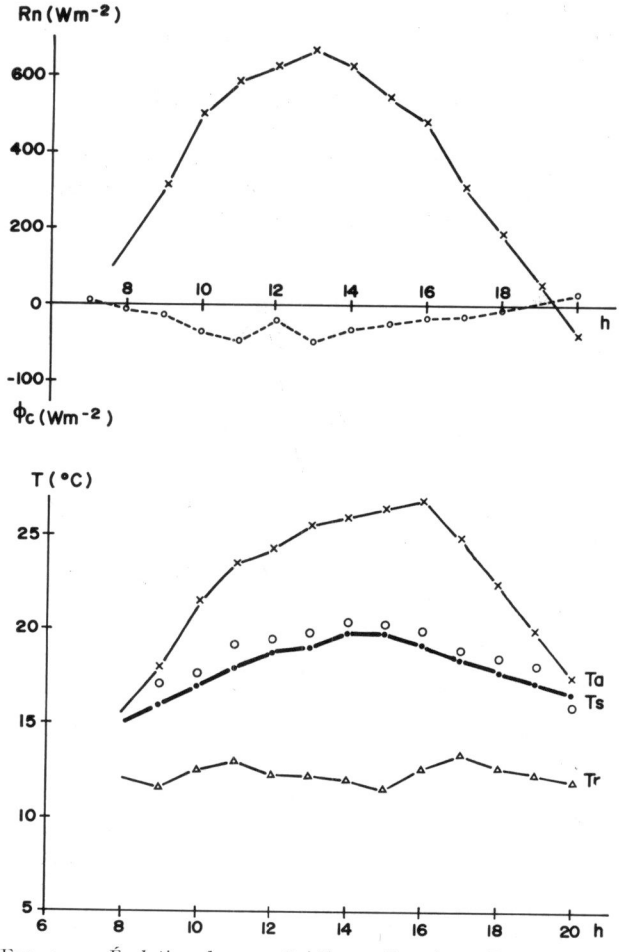


FIG. 3. — *Évolution des caractéristiques climatiques* (Rn, T_a, T_r) *et de la température de surface* T_s *sous couvert de maïs* (La Minière)
(•) Valeurs mesurées de T_s et (○) valeurs calculées (16-08-71)

B. — *Sensibilité du modèle aux différents paramètres*

Les valeurs données (tabl. 1) permettent d'avoir une idée des variations possibles de la température de surface sous couvert de maïs en fonction de différentes températures de l'air associées à des déficits de saturation variables, pour deux valeurs du rayonnement net et de la vitesse du vent :

— toute variation du déficit hydrique conduit à une variation légèrement moindre et de sens opposé de la température de surface (coefficient d'environ 0,6);

— une variation de moitié du rayonnement net conduit à des variations de 2°C par vent assez fort (4 m s^{-1}) ou de 4 à 6°C par vent faible (2 m s^{-1}). En absence de vent (U < 1 m s^{-1} au-dessus du couvert), ces variations peuvent atteindre 10°C, ce qui souligne la forte influence de la vitesse du vent particulièrement au voisinage des faibles valeurs de vent et des forts rayonnements.

— Enfin, une variation également de moitié de la vitesse du vent conduit à des variations de la température de surface d'environ 2 à 3°C par rayonnement net moyen et jusqu'à 5 à 7°C par rayonnement net élevé.

TABLEAU I

Résultats concernant les températures de surface du sol sous couvert suivant différentes conditions

(couvert de maïs, profil de densité de surface foliaire II, fig. 4)

T_a	$T_a - T_r$	$Rn = 520$ W m^{-2}		$Rn = 260$ W m^{-2}	
		$u = 4$ m s^{-1}	$u = 2$ m s^{-1}	$u = 4$ m s^{-1}	$u = 2$ m s^{-1}
		T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_1}	T_{s_2}
18	6	18,4	25,1	16,1	19,2
18	2	20,5	26,8	18,4	21,3
24	10	20,9	26,9	18,9	21,7
24	6	23,2	28,7	21,3	23,9
30	14	23,1	28,4	21,4	23,8
30	10	25,6	30,4	24,0	26,2

C'est par conséquent la combinaison forte radiation très faible vitesse du vent qui correspond aux valeurs maximales de la température de surface. Il est possible, afin de mieux schématiser ces variations, d'écrire la relation 11 *bis* sous une forme analogue :

$$T_{so} = T_a - a_1(T_a - T_r) + a_2\Phi_o + a_3 Rn$$

où a_1 est égal au rapport $P'/(P' + \gamma)$, soit approximativement 0,6, rapport qui ne dépend que de la température moyenne de l'air, et où a_2 et a_3 sont sous la dépendance quasi unique de la structure du couvert considéré et de la vitesse du vent. Dans le cas du maïs, ils prennent les valeurs approximatives suivantes :

	U fort	U faible
a_2	0,010	0,035
a_3	0,005	0,018

Plus la culture est haute et dense, plus les diffusivités turbulentes $K(z)$ sont faibles : les coefficients a_2 et a_3 prennent donc des valeurs plus élevées et jouent un rôle prépondérant dans la détermination de la température de surface du sol.

Cette analyse succincte de la sensibilité du modèle aux différents paramètres en fonction des ordres de grandeur des termes, sera reprise et développée de façon plus générale (§ III) dans le sens de l'utilisation du modèle en vue de la prédiction de l'évolution des températures de surfaces en fonction de la modification des facteurs climatiques et de la structure des couverts.

C. — *Estimation des températures de surface de sol humide sous couvert à partir des données climatiques simples*

Si les mesures du rayonnement net Rn et de la densité de flux conductif Φ_o sont possibles, elles sont généralement plus difficiles à réaliser qu'une simple mesure de température de surface. Aussi, un des intérêts d'une telle formulation est d'estimer la température de surface à partir des grandeurs climatiques classiques.

— Ainsi, le rayonnement net du couvert sera déterminé à partir du rayonnement net de type climatique Rn_* (PERRIER, 1975) :

$$Rn_* = (1 - a)Rg + Ra - \varepsilon\sigma T_a^4$$

qu'il est possible de calculer à partir de diverses formules reposant sur des mesures climatiques (GATES, 1963). Une erreur de 50 W m^{-2} par rapport au rayonnement net réel du couvert conduirait alors à une erreur sur la température de surface de 0,3 à 0,9°C suivant la vitesse du vent (paragraphe précédant).

— De façon générale, les densités de flux conductifs à la surface du sol sous couvert sont toujours faibles (quelques dizaines de Watts par mètre carré) alors que le rayonnement net est plutôt de quelques centaines de W m^2. Une différence d'un facteur dix existe presque toujours entre les termes G et I ($I \gg G$), aussi une estimation de Φ_o à partir de la valeur du rayonnement net au sol (Rn(o)) est le plus souvent suffisante. Ainsi l'approximation

$$\Phi_o = (1/5)\ Rn(o) \qquad (18)$$

conduit à une erreur qui ne dépasse pas 20 W m^{-2} sous couvert, soit une estimation de la température de surface erronée à 0,2 ou 0,5°C suivant la vitesse du vent.

— Enfin le calcul de R$n(z)$ se fera à partir d'une fonction exponentielle simple de type $Rn_*\ e^{-\alpha F(z)}$. Par rapport à cet ajustement ($\alpha \sim 0{,}6$ pour le maïs), une variation de 0,1 de cette valeur de α n'entraîne qu'une variation de la température de surface de 0,2°C (vent fort de 4 m s^{-1}) et de 0,9°C (vent faible de 2 m s^{-1}). Dans le cas d'un sol sec en surface qui réduit la valeur du rayonnement net dans les parties basses et peu dans les parties hautes du couvert, il est possible de tenir compte de cette variation en introduisant une variation de type $Rn_*\ e^{-\alpha F(z)+\alpha' F(z)^2}$ où α' prendrait une valeur comprise entre 0,05 et 0,07 (confirmation paragraphe suivant).

Une estimation de la température de surface d'un sol humide sous couvert pourrait ainsi être obtenue à 1°C près environ à partir d'un calcul du rayonnement net climatique Rn_* et une estimation de la densité de flux conductif Φ_o. Bien entendu, une série de mesures de Rn et Φ_o pour le couvert étudié permettrait une meilleure précision dans la généralisation de l'estimation de la température de surface en fonction de l'évolution du couvert et des différentes conditions climatiques.

Cette analyse nous conduit aussi à souligner le rôle quasiment négligeable joué par les régulations stomatiques des différents niveaux du couvert sur la température

de surface du sol saturé. En effet, pour des conditions climatiques données, quelle que soit cette régulation et l'évapotranspiration réelle qui en découle, les seules variations sont celles dues à $Rn(z)$, et secondairement par voie de conséquence, celles sur Φ_o, variations dont les répercussions sur T_{so} restent comme on vient de le voir assez faibles, au plus 1°C à 1,5°C.

D. — *Extension au cas du sol sec en surface*

Il a été montré que lorsque le sol se dessèche en surface (apparition d'un coefficient de rétention e), il est aisé de calculer théoriquement la nouvelle température de surface et la température de rosée à la surface, à partir de la température de surface T_{so} du sol humide. Cependant, on a montré que ce calcul n'était strictement vrai sous sa forme simple (rel. 14 et 14 *ter* avec $T'_{so} = T_{so}$) que dans la mesure où l'enthalpie H(o) à la surface restait inchangée, soit une même valeur de $Rn(z)$ et de Φ_o pour les deux cas, sol sec et sol humide. Toute modification de ces deux termes (paragraphes précédents) conduit à une erreur parfaitement explicitée (rel. 15 et 15 *bis*) qu'il est possible d'estimer et d'éviter si nécessaire à partir du calcul de la variation réelle ΔT_{so} sur T_{so} due aux variations de $Rn(z)$ et Φ_o.

— En première approximation, négliger ces variations de $Rn(z)$ et Φ_o qui sont respectivement au maximum de l'ordre de 30 W m^{-2} au sol et de 20 W m^{-2}, conduit aux erreurs suivantes pour un sol sec ($e \sim 0{,}8$) :

		$\Delta\Phi_o$	$\Delta Rn(z)$	ΔT_{so}	ΔT_s	ΔT_{rs}
ΔT (°C)	Vent fort (4 m s^{-1})	— 0,2	— 0,3	— 0,5	— 0,6	— 0,45
	Vent faible (2 m s^{-1})	— 0,7	— 0,9	— 1,6	— 1,8	— 1,45

— Au contraire, une estimation de la nouvelle valeur de $Rn(z)$ par rapport au cas humide par adjonction d'un terme en $\alpha' F(z)^2$ dans l'exponentielle, et également, une estimation de Φ_o à partir de la nouvelle valeur de $Rn(o)$, (rel. 18), conduit à réduire sensiblement l'erreur sur la température de surface. Cette erreur, en particulier pour les conditions les plus défavorables — faible vent et forte radiation — reste alors inférieure au degré.

III. — UTILISATION DU MODÈLE

La complexité des paramètres intervenant dans la détermination de la température de surface du sol, (rel. 11 et 11 *bis*), en particulier ceux liés à la structure du couvert, ne permet pas toujours de prévoir directement l'importance des différents facteurs qui déterminent la température T_{so} d'équilibre. La relation 11 *bis* cependant montre que le lien entre le déficit de saturation, le rayonnement net total du couvert, Rn, la densité de flux de chaleur à la surface du sol Φ_o (quoique liée à $Rn(o)$),

et la température de surface, est un lien de linéarité dont les coefficients sont respectivement a_1, a_2 et a_3.

Finalement, seul le rôle de la ventilation et de la structure du couvert intervient de façon complexe à travers les coefficients a_2 et a_3 par le biais des diffusivités turbulentes $K(z)$ et de l'atténuation du rayonnement net $Rn(z)$.

A ces paramètres qui jouent sur la valeur de la température de surface humide T_{so}, il faut naturellement ajouter la variation très importante due à l'humidité de surface, e, ou à celle de la résistance à la diffusion dans la couche sèche à la surface du sol. Cette variation croît très rapidement puisque pour une valeur de T_{so} d'environ 20°C, la température de surface augmente de 1,6°C pour une valeur e de 0,9, mais augmente de 8,5°C lorsque la valeur de e atteint 0,6 (rel. 14 *bis* et *ter*).

Enfin, l'analyse de ces paramètres permet de souligner à nouveau que la température de surface est donc en grande partie indépendante de l'état d'alimentation hydrique de la plante et de son état de régulation stomatique.

Rôle du déficit hydrique.

Dans le cas d'une saturation de la surface du sol, l'accroissement du déficit hydrique de l'air contribue toujours à abaisser les températures de surface qui sont donc, toutes autres conditions restant égales, plus basses en périodes sèches qu'en périodes humides (tabl. 1) ; cependant, la température de l'air étant généralement plus élevée en région sèche qu'en région humide, un effet inverse apparaît alors et la température de surface du sol aurait de ce fait tendance à prendre une valeur supérieure (tabl. 1). Bien évidemment, l'accroissement du déficit hydrique de l'air accroît toujours l'évapotranspiration qui généralement assèche la surface du sol ; alors la diminution du coefficient e accroît très sensiblement la température de surface du sol (rel. 13). Cette relation souligne aussi le fait que, sous serre, avec des humidités de l'air et des diffusivités plus faibles (vent réduit), les températures de surface du sol auront toujours tendance à être plus élevées (tout autre facteur restant égal).

De façon générale, ce rôle du déficit de saturation combiné avec la température de l'air peut s'analyser (rel. 11) en introduisant la température humide de l'air T_h :

$$T_{so} = T_h + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{Rn + \Phi_o}{h_c} + \int_0^h \frac{Rn(z) + \Phi_o}{K(z)} \, dz \right] \qquad (11\ ter)$$

Ainsi la température de surface T_{so} n'est autre que la température humide ($Rn = 0$, $\Phi_o = 0$) corrigé par un terme qui fait intervenir une combinaison entre les apports radiatifs (Rn et $Rn(z)$), la convection par l'intermédiaire du coefficient d'échange h_c au-dessus du couvert (rel. 4) et les diffusivités turbulentes $K(z)$ au sein du couvert.

Rôle de l'énergie radiative.

L'énergie radiative intervient directement et de façon plus complexe dans le terme « intégrale I ». Plus le rayonnement net est important et plus il est absorbé dans les parties basses du couvert, plus la température de surface sera grande. En effet, la diffusivité turbulente étant toujours décroissante vers la profondeur du couvert, de forts rayonnements dans les parties basses accroissent la valeur de l'intégrale qui augmente la valeur de la température de surface. Le tableau 1 montre les

différences entre les températures de surface pour un maïs (La Minière) avec un rayonnement net de 520 W m^{-2} et 260 W m^{-2}. Ces différences, d'environ 2°C par forte ventilation, passent à plus de 5°C par vent faible.

Rôle de la ventilation.

La ventilation joue en sens inverse du rayonnement car elle se trouve combinée au rayonnement (termes I) par le rapport entre rayonnement et coefficient d'échange ou diffusivité (rel. 11). Aux fortes vitesses du vent correspondent toujours un fort coefficient d'échange et des diffusivités plus importantes, soit une diminution des termes G et I (tabl. 1). Comme dans le cas du déficit hydrique, la réduction de la vitesse du vent conduit à des températures de surface plus élevées, cas des zones abritées ou encore des serres et abris plastiques.

Naturellement, si le sens des phénomènes reste valable, les valeurs que l'on peut obtenir par très faible vitesse de vent (< 1 m s^{-1}) au-dessus du couvert deviennent fausses, car le modèle n'introduit pas le rôle de la convection thermique qui apparaît lorsque les vitesses sont trop faibles et les gradients thermiques importants (faible vitesse de vent liée à un fort rayonnement).

Mais comme le profil de rayonnement net, le profil de diffusivité, s'il est dominé par la vitesse du vent, n'en reste pas moins sous la dépendance de la structure du couvert.

Rôle de la structure.

Cette structure joue globalement sur la valeur du coefficient d'échange h_e, mais surtout par l'intermédiaire des profils de $Rn(z)$ et de $K(z)$, sur la valeur de l'intégrale I. Trois types de profils de densité de surface foliaire ont été choisis (fig. 4)

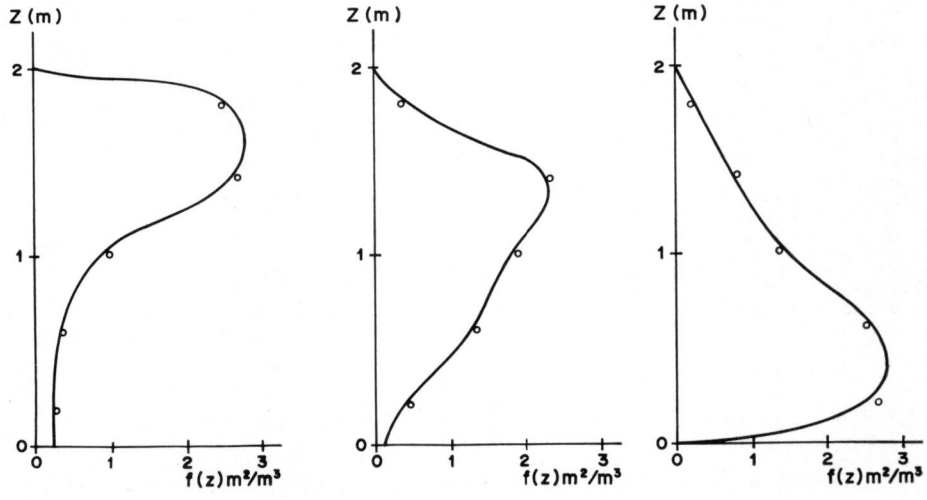


FIG. 4. — *Profil I ; Profil II ; Profil III*

Description des trois types de profil de densité de surface foliaire utilisés dans le modèle. Le profil II correspond aux données obtenues sur maïs (1971, La Minière)
(o) Valeurs données pour le modèle

pour déterminer le rôle de la structure sur la température de surface. Le profil II correspond au cas du maïs, le profil I au cas d'un couvert avec forte densité de feuilles à la surface du couvert et le profil III au cas d'un couvert avec une densité progressive qui croît vers la base du couvert.

Les résultats (tabl. 2) montrent pratiquement une identité entre les résultats des profils I et II. En effet, d'après la relation 16, le profil I conduit à de faibles valeurs du rayonnement dans la partie basse du profil liées à de faibles diffusivités, ce qui tend à diminuer sensiblement la valeur I de l'intégrale ; par contre, la forte densité de la partie supérieure décroît le coefficient d'échange h_c et tend à accroître le terme I. Une certaine compensation se produit donc entre les deux phénomènes expliquant le peu de différence constaté.

TABLEAU 2

Évolutions des températures de surface de sol sous différents couverts déterminés par leur profil de densité de surface foliaire

(Profils I, II et III, fig. 4)

	$Rn = 520$ W m^{-2} ($u = 4$ m s^{-1})						
	T_a	18	18	24	24	30	30
	$T_a - T_r$	6	2	10	6	14	10
Profil n° 1	T_{s1}	18,2	20,3	20,8	23,1	23,1	25,5
Profil n° 2	T_{s2}	18,4	20,5	20,9	23,2	23,1	25,6
Profil n° 3	T_{s3}	21,6	23,5	23,8	25,8	25,7	27,9
	$\Delta T = T_{s3} - T_{s2}$	3,2	3,0	2,9	2,6	2,6	2,3
	$Rn = 260$ W m^{-2} ($u = 4$ m s^{-1})						
	T_a	18	18	24	24	30	30
	$T_a - T_r$	6	2	10	6	14	10
Profil n° 1	T_{s1}	16,0	18,3	18,9	21,2	21,3	24,0
Profil n° 2	T_{s2}	16,1	18,4	18,9	21,3	21,4	24,0
Profil n° 3	T_{s3}	17,5	19,8	20,2	22,5	22,5	25,0
	$\Delta T = T_{s3} - T_{s2}$	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0

Par contre, comme on pouvait s'y attendre, le profil III conduit à une forte augmentation des températures de surface (tabl. 2) du fait d'une certaine rupture de la liaison existante entre rayonnement net (encore élevé) et diffusivité (affaiblie) à la base de la végétation.

La structure verticale du couvert intervient donc de façon non négligeable (1 à 3°C par forte vitesse du vent) sur la température de surface, et des changements dans la structure peuvent permettre certaines modifications (MENZHULIN, 1970). Les écarts sont par ailleurs plus importants dans les gammes des faibles températures de faibles vitesses du vent et pour de forts rayonnements (tabl. 2).

CONCLUSION

Les relations concernant les échanges énergétiques permettent d'analyser globalement un couvert et de relier les caractéristiques climatiques (borne supérieure extérieure au système) aux caractéristiques de la borne inférieure : la surface du sol.

La valeur de cette température de surface se trouve ainsi précisée et paramétrée ; la relation obtenue permet :

— d'estimer la valeur de cette température dans n'importe quelles conditions ;
— de définir aussi, ce qui est sans doute beaucoup plus important, le sens de ses variations, leur ordre de grandeur et les paramètres qui les influencent.

En réalité, les études ont porté principalement sur la température de surface, mais la température ne représente que le pas indispensable pour traiter l'ensemble des échanges au niveau du sol, évaporation et flux de chaleur sensible. La contribution du sol dans les échanges et en particulier, dans l'évapotranspiration, permet en effet de définir la valeur réelle de l'eau transpirée par le végétal et d'atteindre ainsi les facteurs biologiques jouant sur la consommation en eau.

Ces relations théoriques ont aussi conduit à une modélisation du couvert permettant d'interpréter le rôle de sa structure sur les équilibres énergétiques à la surface du sol. Ce premier pas vers la compréhension du rôle de la structure d'un couvert sur les échanges doit se prolonger dans le sens d'une interprétation de la répartition des énergies à chaque niveau et conduire à une analyse des manipulations de la structure de la culture par voie génétique ou phytotechnique.

Reçu pour publication en janvier 1975.

SUMMARY

NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATE OF A MAIZE CANOPY.
VI. — SOIL SURFACE TEMPERATURE STUDY BENEATH CANOPY

Classical transfer equations are presented through the enthalpy equation of air. Soil surface conditions beneath canopy are studied by mean of this equation and soil surface temperatures calculated for wet and dry soil surface. A simplify model of calculation is given and discussed accompanied by some results. Also, an analyse of the soil surface temperature according to climatic factors and structure of the canopy is shortly mentioned in order to demonstrate the predictive role of a such model.

ZUSAMMENFASSUNG

NETTOASSIMILATION,
NUTZUNG DES WASSERS UND MIKROKLIMA IN EINEM MAISFELD.
VI. — STUDIUM DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR
DES BODENS IN EINER KULTUR

Die klassischen Ubertragungsgleichungen, die vorgestellt und auf die Form einer Gleichung für die Enthalpie der Luft reduziert werden, erlauben auf einfachere Weise den Gleichgewichtszustand auf der Ebene eines Bodens unter der Pflanzendecke zu erörtern. Eine Untersuchung der Oberflächentemperatur des feuchten oder trockenen Bodens unter der Vegetation wird also auf diese Weise durchgeführt und dem Experiment gegenübergestellt. Ein Modell für Berechnung und Voraussage wird aufgestellt und besprochen ; hierauf wird im Hinblick auf dieMöglichkeiten des Modells für die Voraussage eine kurze Analyse des Einflusses durchgeführt die die verschiedenen Klimafakoren und die Struktur der Pflanzendecke auf den Temperaturwert der Bodenoberfläche haben.

РЕЗЮМЕ

Чистая ассимиляция, потребление влаги и микроклимат кукурузного поля. — VI. Изучение температуры поверхности почвы под культурой.

А. ПЕРРЬЕ

Классические вычисления переноса, представленные в упрощенном виде формулой дающей энтальпию воздуха, позволяют более удобное изучение равновесного состояния на уровне почвы под растительностью. Изучение температуры поверхности сухой и влажной почв под растительностью было реализовано в этой форме и полученные результаты сравнивались с практикой. В данной работе представлена и обсуждена модель вычислений и прогноза; затем, чтобы подчеркнуть возможности предсказаний этой модели, кратко анализируются влияния различных климатических факторов и структуры покрова на температуру поверхности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M. C., 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *J. Appl. Ecol.*, **3**, 41-54.

CHARTIER P., PERRIER A., VERBRUGGHE M., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. I. Objectifs et présentation du dispositif expérimental de La Minière *Ann. agron.*, **22** (4), 367-381.

CIONCO R. M., 1965. A mathematical model for air flow in a vegetative canopy. *J. Appl. Meteor.* **4**, 517-522.

COWAN I. R., 1968. Mass, heat and momentun exchange between stands of plants and their atmospheric environment. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **94**, 523-544.

DENMEAD O. T., 1973. Relative significance of soil and plant evaporation in estimating evapotranspiration. In : *Colloque sur la réponse des plantes aux facteurs climatiques*, UNESCO, Uppsala (Suède) 15-20 sept. 1970 ; Paris, UNESCO, 505-511

GATES D. M., 1965. Radiant energy, its receipt and disposal. In : *Heat radiant and sensible.* Meteorological monographs., **6** (28), 1-26.

IMPENS I., LEMEUR R., 1969. Extinction of net radiation in different crop canopies. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B, **17**, 403-412.

MENZHULIN G. V., 1970. Procedure for calculating meteorological conditions for a plant association. *Meteor. i Giddrol.*, **2**, 92-99.

PHILIP J. R., 1964. Sources and transfer processes in the air layers occupied by vegetation. *J. Appl. Meteor.*, **3**, 390-395.

PERRIER A., 1967. Approche théorique de la microturbulence et des transferts dans les couverts végétaux en vue de l'analyse de la production végétale. *La Météorologie*, série 5, **4**, 527-550.

PERRIER A., SEGUIN B., 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transfert et des flux dans l'air. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A., Paris.

PERRIER A., 1970. Absorption de l'énergie radiative par un couvert végétal. Influence de celui-ci sur l'intensité des flux en présence. Application au calcul de l'évapotranspiration. In : *Rayonnement solaire et hydrométéorologie.* C. R. Séance d'étude Soc. Fr. Therm., section Énergie Solaire, A. F. E. D. E. S., 22 octobre 1970, 28 p.

PERRIER A., 1975. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. Évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. Agron.*, **26** (1), 1-18.

SHAWCROFT R. W., LEMON E. R., 1973. Estimation of internal crop water status from meteorological and plant parameters. In : *Colloque sur la réponse des plantes aux facteurs climatiques*, UNESCO, Uppsala (Suède), 15-20 sept. 1970 ; Paris, UNESCO, 449-459.

THOM A. S., 1972. Momentum mass and heat exchange of vegetation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **98**, 124-134.

UCHIJIMA Z., 1966. Micrometeorological evaluation of integral exchange coefficient at foliage surfaces and source strengths within a corn canopy. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci.*, série A, **13**, 81-93.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 159-167.

LE RÉCHAUFFEMENT DES SOLS DE CRAIE PAR FILMS PLASTIQUES. MESURES ET BILANS THERMIQUES

J. L. BALLIF et P. DUTIL

Station de Science du Sol, I. N. R. A.,
51000 Châlons-sur-Marne

RÉSUMÉ

Les sols de craie de Champagne sont faiblement colorés et leur réchauffement au printemps est très lent. Recouverts de film de polyéthylène transparent, ils ont alors un réchauffement plus rapide et plus précoce, avec des températures décadaires plus élevées et un gradient thermique plus important. L'emploi de film opaque montre une efficacité thermique inférieure à celle du film transparent.

Dans les deux cas d'expérience, sol nu et sols recouverts de films plastiques, au cours d'un nycthémère, les températures extrêmes du sol apparaissent avec un certain retard, selon la profondeur et la loi de propagation sinusoïdale. Dans les conditions climatiques locales, les échanges thermiques diurnes concernent les quinze premiers centimètres de sol.

D'une manière générale, les gains de chaleur acquis pendant le jour sont perdus pendant la nuit. En sol nu et par temps froid, le réchauffement commence au début de la journée et dure environ neuf heures. La pénétration du flux thermique est de l'ordre de 5 cm/h, de 0 à 10 cm de profondeur et de 1,3 cm/h de 10 à 20 cm.

Avec le film transparent, bien que les pertes soient plus grandes, l'emmagasinement diurne de chaleur est plus élevé qu'en sol nu. Le bilan journalier montre un gain thermique de 4 à 6 p. 100 de l'énergie issue de la radiation arrivant au sol.

Les sols de craie, peu colorés, se réchauffent lentement au printemps. Cette situation a été améliorée par l'utilisation de films plastiques placés sur le sol dès les semis, et plusieurs expérimentations ont déjà montré l'effet très favorable de cette technique sur la croissance et le développement du maïs en Champagne (BALLIF et DUTIL, 1971, 1974). En particulier, il était apparu que la vitesse de réchauffement du sol au printemps constituait l'un des facteurs limitants essentiels du début de croissance des plantes. Afin de préciser l'intensité du phénomène thermique, il a été effectué des mesures de températures d'une manière continue dans le sol, sous diverses couvertures. Les résultats obtenus permettent d'effectuer des bilans thermiques sur

courtes périodes, en particulier à l'échelle de nycthémères, et de mieux apprécier ainsi la pénétration journalière du flux thermique sous l'effet de la radiation globale et les déperditions nocturnes.

I. — DISPOSITIF DES MESURES

Les températures du sol ont été mesurées à l'aide de thermorésistances reliées à des enregistreurs, depuis le 17 avril — date du semis du maïs — jusqu'au 15 juillet — date à laquelle le recouvrement du sol par le feuillage devient trop important. Les sondes étaient placées à : 1, 10, 20 et 30 cm de profondeur dans des sols cultivés en maïs, non recouverts et recouverts de films de polyéthylène transparent et opaque, de 40 microns d'épaisseur. Par ailleurs, on dispose des résultats des mesures thermiques classiques obtenus sous abri météorologique et de la mesure de la radiation solaire globale. Pour simplifier la présentation, les résultats sont indiqués par moyennes décadaires.

II. — RÉSULTATS GÉNÉRAUX

On sait que l'évolution des températures dans le sol est assez bien traduite par une fonction sinusoïdale avec amortissement de l'amplitude en fonction de la profondeur et déphasage qui dépendent des caractéristiques thermiques du sol et de la période à la surface.

A. — *Évolution des températures décadaires*

Dans le cas considéré, l'évolution des températures moyennes décadaires des sols (sol de craie) et de l'atmosphère est la suivante (tabl. 1 et fig. 1) :

— La température ambiante (abri météorologique) est faible en avril (5,8-9,4°C), puis elle se maintient à 12-15° de mai jusqu'à la mi-juin, et atteint 20,1°C en juillet.

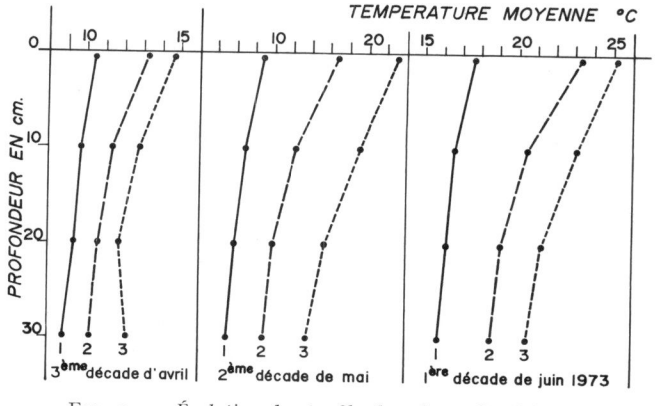


FIG. 1. — *Évolution des profils thermiques décadaires*

1 ●——● Sol nu
2 ●— — —● Sol avec plastique opaque
3 ●- - - - - -● Sol avec plastique transparent

TABLEAU I

Températures décadaires
(1973)

Mois	Déc.	Air	Sol											
			1			10			20			30		
			sans	avec plastique		sans	avec plastique		sans	avec plastique		sans	avec plastique	
				T	O		T	O		T	O		T	O
Minimales														
Avril	2	1,7												
	3	4,3	4,2	7,3	6,9	7,3	**10,1**	8,7	8,1	**10,5**	9,7	8,1	**10,5**	9,5
Mai	1	8,6	7,7	**11,6**	10,5	**10,4**	14,0	12,3	11,1	14,1	13,0	11,1	14,1	12,3
	2	6,1	6,0	10,6	9,6	9,6	15,0	12,8	11,2	15,4	13,8	11,4	15,3	13,7
	3	10,1	**10,5**	14,5	13,4	**13,1**	17,9	15,7	13,4	18,1	16,3	13,5	17,9	16,1
Juin	1	9,6	10,1	15,0	14,3	13,3	18,8	17,0	14,7	19,2	17,7	14,8	19,2	17,7
	2	11,2	12,7	17,6	17,1	16,1	21,4	20,3	17,7	22,0	21,2	17,3	21,7	20,8
	3	12,9	14,3	18,0	17,8	17,2	19,7	20,4	18,6	21,6	21,1	19,1	22,0	21,0
Juillet	1	13,7	15,9	19,4	18,9	19,1	21,0	21,8	20,8	23,1	22,6	20,9	23,2	22,6
	2	12,5	13,1	18,6		17,3	21,8		18,8	22,7		18,9	22,6	
Maximales														
Avril	2	10,1												
	3	15,3	20,5	28,0	25,6	12,6	15,9	13,7	10,2	13,0	11,7	9,7	12,2	11,2
Mai	1	16,2	18,9	28,8	23,9	14,5	19,4	16,0	12,9	16,6	14,5	12,5	15,9	14,1
	2	18,3	24,9	36,7	30,5	17,3	24,5	19,7	14,4	19,7	16,3	13,7	18,0	15,6
	3	19,6	23,6	35,4	29,6	19,1	25,4	20,8	17,0	21,3	18,4	16,2	20,4	17,9
Juin	1	20,4	27,2	39,8	36,4	20,1	27,8	24,3	17,5	23,2	20,6	16,7	22,0	19,8
	2	23,5	33,9	44,2	41,5	25,2	30,5	29,0	21,7	26,2	24,4	19,8	24,5	23,2
	3	24,7	35,0	43,7	37,7	25,8	27,5	26,7	22,2	25,1	23,7	21,5	24,3	23,2
Juillet	1	26,6	38,5	46,1	36,0	28,4	28,8	27,4	24,0	26,5	24,6	24,3	25,4	24,1
	2	22,5	30,8	41,0		24,4	27,5		21,6	24,7		21,0	24,2	
Moyennes														
Avril	2	5,9												
	3	9,8	10,4	14,7	13,3	9,7	12,8	11,2	9,4	11,7	10,6	8,8	12,1	10,2
Mai	1	12,4	12,3	17,4	15,6	12,1	**16,5**	14,1	12,0	15,3	13,6	11,8	14,8	13,6
	2	12,2	14,3	21,5	18,4	13,4	19,5	16,1	12,9	17,7	14,9	12,5	16,7	14,5
	3	14,9	16,8	22,9	19,9	**16,0**	21,3	18,1	15,5	19,4	17,4	15,1	19,0	16,9
Juin	1	15,0	17,6	25,1	23,3	**16,5**	23,0	20,4	16,1	21,1	19,0	15,7	20,4	18,6
	2	17,3	21,8	28,0	27,3	20,5	25,4	24,4	19,6	24,0	22,8	19,0	23,3	22,3
	3	18,8	22,5	27,2	25,9	22,1	23,2	23,3	20,3	23,3	22,3	20,2	22,6	22,0
Juillet	1	20,1	24,9	29,2	27,4	23,6	24,6	24,6	22,6	24,9	23,8	22,2	24,3	23,4
	2	17,5	20,7	27,4		20,2	24,6		20,0	23,8		19,8	23,4	

T = transparent ; O = Opaque.

— En sol non couvert, les températures moyennes à 1 et 10 cm sont supérieures à celles de l'atmosphère à partir de la 2e décade de mai et suivent la même évolution (à 10 cm, 9,7° en avril et 16,0° à la fin du mois de mai), celles à 20 et 30 cm étant légèrement inférieures. Le gradient thermique dans les vingt premiers centimètres du sol est faible (1° en avril, 2° en juin). Les températures minimales à 10 cm restent inférieures à 10° jusqu'à la 1re décade de mai.

— En sol couvert de film de polyéthylène transparent, aux quatre profondeurs étudiées, les températures moyennes sont toujours plus élevées : de la fin du mois d'avril au début du mois de juin, à 10 cm de profondeur, les écarts varient de 3,1 à 6,5° par rapport au sol nu ; à 20 et 30 cm, ces écarts sont légèrement plus faibles. *Le gradient thermique est plus élevé* (3° en avril et 4° en juin). Dès la 3e décade d'avril, au-delà de 10 cm, les températures minimales sont supérieures à 10°. Leurs différences avec celles du sol non couvert passent de 2,9° en avril à 5,5° en juin. Les écarts des températures maximales sont plus élevées (3,3°-7,7°C).

— En sol couvert du film de polyéthylène opaque, les températures moyennes sont toujours plus élevées qu'en sol nu, mais inférieures à celles du sol couvert du film transparent.

B. — *Évolution des amplitudes décadaires*

Les amplitudes décadaires des températures du sol recouvert de film transparent, sont les plus élevées à 1 cm de profondeur (17,2-26,7°C, aux 1res décades de mai et de juillet) ; celles à 10 cm sont également plus élevées jusqu'à la 1re décade de juin (5,4-9,5°C, aux 1res et 2e décades de mai), puis elles sont plus faibles que celles du sol non recouvert. En profondeur, les amplitudes suivent pratiquement la même évolution, mais avec des valeurs plus faibles : en sol recouvert du même film, à 20 cm (2,5-4,3°C, aux 1res et 2e décades de mai) et à 30 cm (1,7-2,8°C, aux 1res décades de mai et de juin).

C. — *Aspect global du réchauffement*

Le réchauffement du sol nu est très lent ; celui du sol recouvert de film de polyéthylène transparent est plus rapide et plus précoce, avec des températures décadaires minimales et maximales plus élevées et un gradient thermique plus important. Le sol recouvert de film opaque se réchauffe moins vite que celui recouvert du film transparent.

III. — MÉCANISME DE DÉTAIL

A. — *Évolution des températures horaires du sol au cours d'un nycthémère*

Au cours d'un nycthémère, les températures horaires à 1, 10, 20 et 30 cm évoluent selon un cycle qui se partage en deux phases : l'une avec gain et l'autre avec perte de chaleur.

En sol nu (fig. 2), les températures extrêmes apparaissent respectivement à 13, 16, 19 et 22 heures pour les maxima et 6, 7, 8, 11 heures pour les minima, soit, selon la loi de l'attaque sinusoïdale, avec un certain retard selon la profondeur. En sols recouverts de films, les valeurs sont plus élevées et les phases décalées, leur durée n'étant pratiquement pas modifiée (fig. 3).

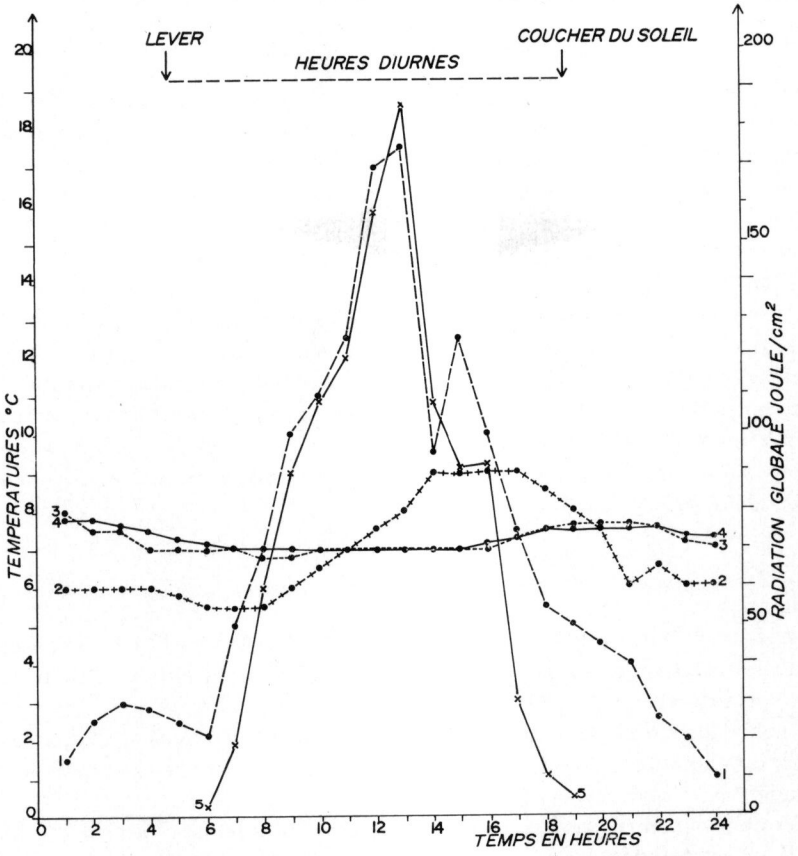


FIG. 2. — *Évolution thermique du sol nu au cours du 22 avril 1973* (jour froid)

1 ●— — — —● Sol (1 cm)
2 ●+ + + + +● — (10 cm)
3 ●- - - - - - - - -● — (20 cm)
4 ●————————● — (30 cm)
5 ×————————× Radiation globale en Joule/cm²

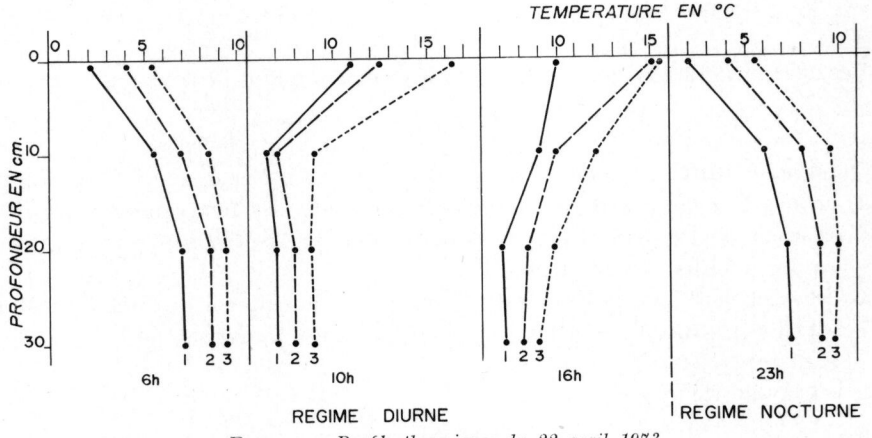


FIG. 3. — *Profils thermiques du 22 avril 1973*

1 ●———— Sol nu
2 ●— — — — Sol avec plastique opaque
3 ●- - - - - - - - - Sol avec plastique transparent

Avec le film transparent, le réchauffement du sol est le plus rapide et le plus intense : à 10 cm, la température obtenue à 10 heures (9°C) est atteinte à 14 heures en sol avec film opaque et en sol nu. La vitesse de progression de l'onde thermique, calculée d'après le début de l'augmentation de température, serait en sol nu de 5 cm/h entre 1 et 10 cm et de 1,3 cm/h entre 10 et 20 cm. Par contre, en sol avec film transparent, cette vitesse serait de 5 cm/h, non seulement entre 1 et 10 cm mais également entre 10 et 20 cm.

L'amplitude thermique décroît évidemment avec la profondeur. En sol nu, les valeurs aux quatre profondeurs sont les suivantes, le 22 avril : 16,0-3,5-0,8-0,5°C. En surface (0-10 cm), les amplitudes sont augmentées par l'application des films : en profondeur (20-30 cm), elles sont comparables et de valeurs très faibles. La profondeur maximale journalière de pénétration décelable de la chaleur se situerait à 30 cm. *Les échanges thermiques diurnes sont essentiellement importants dans les quinze premiers centimètres du sol.*

B. — *Emmagasinement de chaleur et radiation globale. Bilan thermique*

En sol recouvert de film transparent et pour l'horizon (0-15 cm), le gain thermique est plus élevé qu'en sol nu ; ceci est dû à une accumulation de chaleur beaucoup plus importante en phase diurne.

De plus, le refroidissement nocturne est important. En avril et mai, alors que les températures ambiantes sont encore faibles, la chaleur stockée pendant le jour est en grande partie perdue pendant la nuit.

L'emmagasinement réel de chaleur dure environ 9 heures/jour ; il commence au moment où les températures à 1,10 et 20 cm sont égales et se termine par l'abaissement de la température maximale à 10 cm. Au cours de cette période, le réchauffement du sol est peu élevé par temps couvert et beaucoup plus important par beau temps (tabl. 2). L'albédo de ce sol nu et sec (31 p. 100) est comparable à celui du sol recouvert de film transparent (32 p. 100) ; celui du sol nu et humide est plus faible (21 p. 100).

Il est possible de faire un calcul approché de la chaleur emmagasinée par le sol à partir de la chaleur accumulée dans la tranche h, où ont lieu les principales variations.

Les bilans thermiques journaliers ont été calculés à l'aide de la formule suivante :

$$Q = (t_2 - t_1) \times C \times da \times h$$

où Q est la quantité de chaleur fixée ou perdue par le sol d'épaisseur « h » en kcal/m$_2$;

t_2-t_1 en degré celsius, sont, pour le calcul des gains, les températures maximale et minimale du jour considéré ; pour celui des pertes, t_1 correspond à la température minimale du lendemain ;

C est la chaleur spécifique en kcal/kg/°C. La valeur du sol de craie à l'état sec est de 0,19 cal/g/°C. Cette valeur a été modifiée selon l'humidité du sol, qui était contrôlée périodiquement ;

da est la densité apparente en kg/m^3 et

h est l'épaisseur (en m) du sol considéré.

Par beau temps, les gains journaliers de chaleur par rapport au sol nu, sont

augmentés de 110 à 430 kcal/m² avec le film transparent et de 50 à 360 kcal/m² avec le film opaque. Cette augmentation est importante en avril et mai, puis s'atténue en juin.

Par temps couvert, ce gain de calories est très faible, les différences étant peu conséquentes avec le film transparent et généralement nulles avec le film opaque. La proportion de la radiation globale absorbée par beau temps reste faible : 7,5 à 9,9 p. 100 en sol nu, 9,4 à 14,8 p. 100 en sol couvert de film opaque, et 11,5 à 16,2 p. 100 en sol recouvert de film transparent.

TABLEAU 2

Gain journalier de chaleur
Sols 0-15 cm

Dates 1973	Période d'emmagasinement							
	Observations	Radiation globale (kcal/m²)	Gain					
			kcal/m²			Pourcentages de la radiation globale		
			Sols			Sols		
			sans	avec plastiques		sans	avec plastiques	
				opaque	transp.		opaque	transp.
22 avril	couvert	2 350	250	260	350	10,6	11,0	14,8
24 —	beau temps	4 920	370	730	740	7,5	14,8	15,0
1 mai	couvert et brumeux	900	150	120	140	16,8	13,4	15,6
9 —	très nuageux	1 810	140	190	300	7,7	10,5	16,6
12 —	beau temps	5 430	450	740	880	8,3	13,6	16,2
25 —	beau temps	6 050	520	570	820	8,6	9,4	13,5
30 —	couvert	1 200	50	40	110	4,1	3,0	9,0
17 juin	beau temps	5 760	570	660	790	9,9	11,4	13,7
21 —	couvert	1 470	50	40	81	3,4	2,7	5,5
26 —	beau temps	6 320	620	600	730	9,8	9,5	11,5

CONCLUSION

Dans les sols peu colorés de la Champagne, le réchauffement du sol durant les mois d'avril et mai n'intéresse qu'une faible profondeur de sol, de l'ordre de 10-20 cm. D'une manière générale, les gains de chaleur acquis pendant la journée sont perdus pendant la nuit. En sol nu et par temps froid, le réchauffement commence au début de la journée et dure environ 9 heures. La pénétration du flux thermique est de l'ordre de 5 cm/h de 0 à 10 cm de profondeur et 1,3 cm/h de 10 à 20 cm.

Les films plastiques transparents améliorent fortement le rendement thermique

du stockage, et d'une manière nettement supérieure aux films opaques. Avec les films transparents, l'emmagasinement diurne de la chaleur est plus élevé qu'en sol nu, mais les pertes sont également plus grandes ; cependant, dans le bilan journalier, il y a un gain accru par suite d'un réchauffement plus intense pendant la même durée d'action. Par beau temps, ces films peuvent contribuer à un gain thermique journalier supplémentaire dans le sol, variant de 110 à 430 kcal/m², et représentant un accroissement de 4 à 6 p. 100 dans le captage d'énergie issue de la radiation arrivant au sol. Ces résultats soulignent l'intérêt de la technique des recouvrements plastiques transparents en région à printemps froid, mais cependant pourvus d'une bonne luminosité.

Reçu pour publication en février 1975.

SUMMARY

THE WARMING UP OF CHALK SOILS BY PLASTIC FILMS. THERMIC MEASUREMENTS AND EVALUATIONS

The chalk soils of Champagne are faintly coloured and their warming up in the spring is very slow. Covered over with transparent polyethylene film, they then have a quicker and earlier warming up, with higher decadal temperatures and a steeper thermic gradient. The use of opaque film proved less effective thermically than transparent film.

In the two experimental cases : bare soil and soils covered with plastic films, during a nycthemeron, the extreme temperatures of the soil appear with some delay according to depth and the law of sinusoidal propagation. In the local climatic conditions, the diurnal thermic exchanges affect the upper fifteen centimeters of soil.

In a general way, the heat gains acquired during the day are lost during the night. With bare soil, in cold weather, warming up starts at the beginning of the day and lasts about nine hours. The penetration of the thermic flow is in the region of 5 cm/h from 0 to 10 cm depth and 1.3 cm/h from 10 to 20 cm.

With transparent film, although losses are greater, the diurnal accumulation of heat is greater than in bare soil. The daily evaluation shows a thermic gain of 4 to 6 p. 100 of energy from the radiation reaching the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE ERWÄRMUNG VON KREIDEBÖDEN DURCH PLASTIC-FOLIEN

Die Kreideböden der Champagne sind schwach gefärbt und ihre Wiedererwärmung im Frühjahr ist sehr langsam. Von durchsichtigem Polyaethylen-Folien bedeckt, erfolgt die Aufwärmung rascher und früher, mit höheren Nachttemperaturen und einem bedeutenderen Temperaturgradienten. Die Verwendung von undurchsichtigen Folien zeigt eine geringere Wärmewirksamkeit als von durchsichtigen Folien.

In den beiden Fällen des Versuchs, unbedeckter und mit Plasticfolien bedeckte Böden, erscheinen die extremen Bodentemperaturen mit einer gewissen Verzögerung je nach Tiefe und entsprechend dem Gesetz der sinusförmigen Ausbreitung. Unter den lokalen Klimaverhältnissen betrifft der tägliche Wärmeaustausch die obersten 15 cm des Bodens.

Im Allgemeinen wird der während des Tages erworbene Wärmegewinn während der Nacht wieder eingebüsst. Im unbedeckten Boden und bei kaltem Wetter beginnt die Aufwärmung zu Beginn des Tages und dauert ungefähr 9 Stunden. Der Wärmefluss dringt in einer Tiefe von 0-10 cm ungefähr mit 5 cm/ha und in einer Tiefe von 10-20 cm mit etwa 1,3 cm/h ein.

Bei durchsichtigen Plasticfolien ist die tägliche Wärmespeicherung grösser als bei unbedecktem Boden, obwohl auch die Verluste grösser sind. Die Tagesbilanz zeigt einen Wärmegewinn von 4-6 p. 100 der am Boden ankommenden Strahlungsenergie.

РЕЗЮМЕ

Согревание меловых почв с помощью пленок из пластмассы.

Ж. Л. БАЛЛИФ, П. ДЮТИЛЬ.

Меловые почвы Шампани окрашены очень слабо и согреваются они весной довольно медленно. Если их покрыть прозрачной полиэтиленовой пленкой согревание произойдет быстрее, раньше, с достижением более высоких температур и большего термического градиента. Применение непрозрачной пленки — термически не оправдывается.

В обоих вариантах опыта (голая почва и почва покрытая пленкой из пластмассы) крайние температуры почвы достигаются с некоторым запозданием, в зависимости от глубины, и следуют закону синусоидального распространения.

В местных климатических условиях тепловой обмен наблюдается днем только в первых 15-ти сантиметрах почвы. Обычно, тепло накопленное почвой за день, теряется за ночь.

В голой почве, в холодную погоду, потепление начинается с утра и длится приблизительно 9 часов. Тепловой поток проникает в почву со скоростью равной приблизительно 5-ти см в час до глубины в 10 см. и со скоростью 1,3 см. в час между 10-ью и 20-ью см. глубины.

Несмотря на крупные потери теплоты почвой при применении прозрачной пленки, дневное накопление теплоты в покрытой почве больше чем в почве голой. Суточный баланс показывает тепловое увеличение энергии излучения достигшего до земли от 4 до 6 %.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALLIF J. L., DUTIL P., 1971. Effet d'un film de matière plastique sur la culture du maïs en Champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric.*, **57**, 286-302, et in *Plasticulture*, 1972, **16**, 33 p.

BALLIF J. L., DUTIL P., 1974. Utilisation de films plastiques photodégradables pour la culture du maïs en Champagne crayeuse. *C. R. Acad. Agric.* **60**, 389-401.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 169-197.

ÉTUDE DES EFFETS CUMULÉS ET DES ARRIÈRE-EFFETS DE PLUSIEURS FACTEURS AGRONOMIQUES APPLIQUÉS DANS LE CADRE DE ROTATIONS POSSIBLES DANS LA HARDT IRRIGUÉE

I. — Résultats partiels sur cultures de maïs grain

R. SPECTY

Service d'Expérimentation et d'Information,
Centre de Recherches de Colmar, I. N. R. A.,
68021 Colmar

RÉSUMÉ

Faisant suite aux essais d'irrigation entrepris par le Service du Génie Rural en vue de guider l'aménagement de la Hardt, un lourd dispositif expérimental fut mis en place à Algolsheim en 1966 par la section S.E.I. de Colmar. Il doit permettre de révéler aux agriculteurs les effets provoqués à terme par l'adoption systématique et répétée de certaines techniques. Les diverses options retenues tiennent compte de l'évolution locale des structures et systèmes de production, ainsi que du souci de maintenir une certaine fertilité du sol. On mesure sur maïs (culture commune à toutes les rotations) présent chaque année sur une série de soles ayant des « histoires » différentes, les effets cumulés et arrière-effets de diverses options portant sur la rotation, l'irrigation et l'enfouissement des résidus de récolte.

Dans les conditions des champs d'essais, l'irrigation du maïs est impérative et gagne à être accompagnée de mesures tendant à améliorer la nutrition de la plante. L'implantation d'une culture de type « luzerne » dans la rotation est d'autant plus nécessaire à la culture du maïs que l'irrigation a été retenue ; elle peut s'avérer indispensable selon la succession choisie de cultures annuelles. Comme le révèle l'étude des interactions, on doit traiter séparément l'effet « retour du maïs sur lui-même » suivant qu'il y ait ou non présence de luzerne dans la rotation. S'il est valable de faire maïs sur maïs en culture relativement extensive, cette pratique paraît moins justifiée lors de la recherche de rendements élevés.

I. — INTRODUCTION

La mise en place du canal de la Hardt et d'un dispositif permettant aux agriculteurs locaux d'accéder à l'irrigation, a motivé une série de démonstrations, engagées par les Services du Génie Rural, en liaison avec les Bioclimatologistes de l'I. N. R. A. Dans une première phase, on a pu montrer l'effet bénéfique des apports

d'eau sur certaines cultures de printemps : maïs, pommes de terre (entre autres), définir des modalités optimales d'application de l'irrigation et faire fonctionner un Service d'avertissement qui, après mise au point, est maintenant confié aux organismes professionnels locaux.

Il est évidemment utile de disposer de ces données expérimentales élémentaires, mais elles ne répondent que partiellement aux préoccupations des agriculteurs soucieux de connaître les effets provoqués à terme, par l'adoption systématique et répétée de certaines techniques. C'est pour recueillir des éléments complémentaires en ce sens, qu'à dater de 1966, un dispositif expérimental plus lourd fut mis en place sur les terrains d'Algolsheim, exploités par la Section S. E. I. de Colmar.

Les thèmes introduits dans ce nouveau dispositif ont été choisis en fonction de tendances qui se sont révélées quant à l'évolution des structures et systèmes à production de l'agriculture locale. Une analyse prospective préparée par le Centre de Gestion et d'Économie rurale de la Côte-d'Or montrait en effet que l'on risquait d'assister à un accroissement simultané des effectifs de deux catégories d'exploitations, les unes cultivant plus de 50 ha et s'orientant vers des systèmes simplifiés de productions à base céréalières, les autres de plus faible dimension (30-40 ha) adoptant des systèmes plus intensifs, incluant notamment des cultures maraîchères industrielles et conservant plus ou moins un secteur d'élevage bovin.

Partant de cette observation, nous avons essayé de concevoir quels types de cultures et de rotations pourraient être amenés à pratiquer ces deux catégories d'entreprises. Pour la première, il était intéressant de penser à des modèles très simplifiés de rotations céréalières, faisant plus ou moins place à d'autres cultures industrielles, choisies en fonction des débouchés ouverts localement. Néanmoins, nous nous demandions dans quelles mesures l'adoption des successions d'un tel type n'allait pas avoir de répercussions graves sur le plan agronomique : les sols de la Hardt sont généralement peu profonds, contiennent souvent plus de 50 p. 100 de cailloux et reposent sur des lits de gravier ou cailloux roulés. Les effets possibles de l'irrigation répétée pourraient être de divers ordres : lessivage d'éléments fins de surface et constitution d'horizons d'accumulation relativement imperméables ; minéralisation accélérée des matières organiques disponibles, d'autant plus à redouter que le système d'apport d'eau retenu était l'aspersion et que les déficits à combler se situaient en période de fin d'été — début d'automne ; entraînement accru vers la nappe d'éléments minéraux moins retenus par suite de la diminution de la teneur en matière organique des sols soumis à l'irrigation, etc. Il paraissait donc utile d'introduire, dans le nouveau dispositif expérimental, des traitements garantissant, à priori, le maintien de la fertilité du sol. Comme certaines entreprises conservaient une option élevage, nous avons pensé à la luzerne.

II. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ADOPTÉ

1. — *Généralités*

Très couramment, l'expérimentation agricole ne met en jeu simultanément qu'un nombre limité de facteurs, chacun d'eux intervenant à plusieurs niveaux. Par ailleurs, un dispositif n'est installé que pour une saison en un site donné. La maîtrise des conditions climatiques n'étant pas

assurée, un même type d'essai est reproduit plusieurs années de suite, dans des situations aussi comparables que possible. Ce qui permet d'estimer un « effet année », avec lequel se confondent d'ailleurs ceux de beaucoup d'autres facteurs plus ou moins pris en compte lors du choix du site d'installation des essais.

Sauf cas particuliers, les effets cumulés et les arrière-effets de traitements appliqués ou subis ne sont pas mesurés. Par contre, dans une exploitation agricole normale, et d'autant plus que son système de production se simplifie, de tels effets sont à prendre en compte. Chaque parcelle a une « histoire », mais les arrière-effets ne sont pas perceptibles à un instant donné car communs à toutes les soles portant la même culture ; ils ne sont pas perceptibles non plus au cours du temps par suite des variations interannuelles (notamment climatiques) des conditions de croissance. Il devient donc impossible d'en saisir l'existence et a fortiori d'en estimer l'importance.

Le dispositif retenu à Algolsheim permet de remédier à ces inconvénients ; la culture-test présente chaque année sur une série de soles ayant des antécédents différents, mais déterminés pour des séquences de temps correspondant aux rotations, est le maïs.

2. — *Présentation des facteurs*

2. 1. *Irrigation.*

Deux options ont été retenues :

I = culture irriguée,
NI = culture non irriguée.

L'optimisation des bilans hydriques par irrigation de complément permet de supprimer d'importantes contraintes lors de l'expression des potentialités culturales. Cette « levée d'inhibition » est cependant différemment ressentie selon les cultures et leur histoire. Quels sont chaque année, en conditions hydriques naturelles d'une part, et sous irrigation d'autre part, les rendements du maïs inclus dans diverses rotations? Les différences de rendements justifient-elles et sous quelles conditions l'adoption de l'irrigation? Y a-t-il suivant les options, évolution dans les rendements, stabilisation, interaction entre l'irrigation et les autres facteurs?

2. 2. *Type de rotation.*

Deux grands types ont été comparés :

T_1 : succession de cultures annuelles ;
T_2 : succession de cultures annuelles interrompues par une luzernière.

La perte possible de fertilité des sols par succession de cultures annuelles, (type 1 : 4 années de rotation) analysée sur maïs, est combattue par la mise en place pour 4 ans d'une luzernière (type 2 : 8 années de rotation). Cependant, l'introduction de la luzerne suppose que l'on valorise sa production, soit sous forme simple : fabrication et vente de foin ou fourrage déshydraté, soit en incluant un poste élevage dans les exploitations.

2. 3. *Variantes de rotation.*

Dans chaque type de rotations, trois options ont été choisies :

V_1 = option céréalière : maïs, blé dur, orge ;
V_2 = option à 2 céréales et 2 cultures industrielles : maïs, pois, colza, blé d'hiver ;
V_3 = option à 3 céréales séparées par une sole très intensifiée valorisant au mieux l'irrigation : maïs, pois et haricot, blé d'hiver, orge.

Les éventuels accidents de rotation pouvant intervenir sur le maïs avec l'option céréalière courante pour la région (V_1) sont contrecarrés par la diversification des cultures et l'introduction de plantes légumières et industrielles (V_2) ou par simple intensification de la culture légumière améliorante (V_3) retenue, car, à l'époque de la mise en place du dispositif, une industrie de transformation locale permettait l'écoulement des produits.

2. 4. *Enfouissement des pailles.*

Les parcelles de la version céréalière (V_1 de T_1 et T_2) supportent les deux sous-traitements :

E = enfouissement des résidus de récolte
NE = non enfouissement.

Il n'est pas rare dans la région de voir les céréaliers exporter leur paille. Que risque-t-il de se passer d'ici quelques années sur maïs si le niveau de matière organique dans les sols n'est pas maintenu, surtout en utilisant de l'eau?

2. 5. *Année de culture* (pour le maïs, plante-test).

Dans la rotation typiquement céréalière, le maïs se succède à lui-même :

1re année = première paille = P_1
2e année = deuxième paille = P_2.

Si lors de la rotation céréalière, le bilan humique est équilibré, d'autres phénomènes liés par exemple à la concentration de parasites spécifiques peuvent faire chuter le rendement. La réponse peut dépendre de la présence ou de l'absence de luzerne dans la rotation.

3. — *Méthode expérimentale*

3. 1. *Dispositif concernant les rotations.*

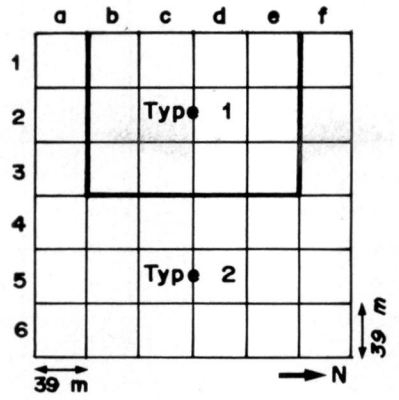
Le rendement est systématiquement affecté par les facteurs du climat. Comme nous voulons comparer l'effet cumulé des diverses options, toutes les cultures prévues doivent être représentées chaque année sur le terrain à la place normale qu'elles occupent dans les diverses rotations. Ceci implique (tabl. 1) le quadrillage du terrain en 36 soles élémentaires (de 39 × 39 m = 1525 m^2). Le premier type est représenté par 12 soles de culture (voir plan 1), 4 de chaque variante 1, 2 et 3 (voir plan 2) pour faire figurer toutes les années de rotation, ces dernières ayant débuté en 1966 comme l'indique le plan 3. Le deuxième type est représenté par 4 soles puisque chacune des 3 variantes comporte 8 années de rotation. L'implantation des différentes soles est définitive (plan 6). Notons qu'il n'y a pas de répétition dans l'espace des diverses options concernant la rotation, et que l'emplacement des soles a été systématiquement réparti de manière à regrouper le plus possible celles qui portent la même culture (voir plan 3 et tableau 1) et à permettre, sur le terrain, une identification aisée. L'homogénéité du sol est à contrôler.

TABLEAU I

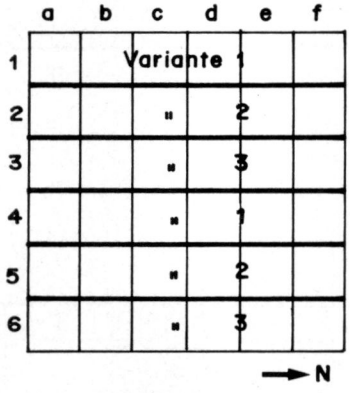
Rotations en présence

m : maïs — c : colza
bd : blé dur — bh : blé d'hiver
o : orge — p & h : pois et haricot
p : pois

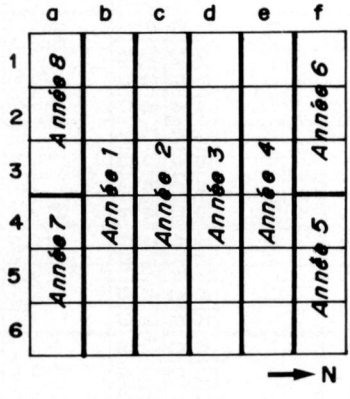
	-	T1		-	T2		-	
	-v1	-v2	-v3	-v1	-v2	-v3	-	
1′	m	m	m	m	m	m		1′
2′	m	p	p&h	m	p	p&h		2′
3′	bd	c	bh	bd	c	bh		3′
4′a	o	bh	o	o	bh	o		4′
				I	I	I		5′
				I	I	I		6′
				I	I	I		7′
				I	I	I		8′a



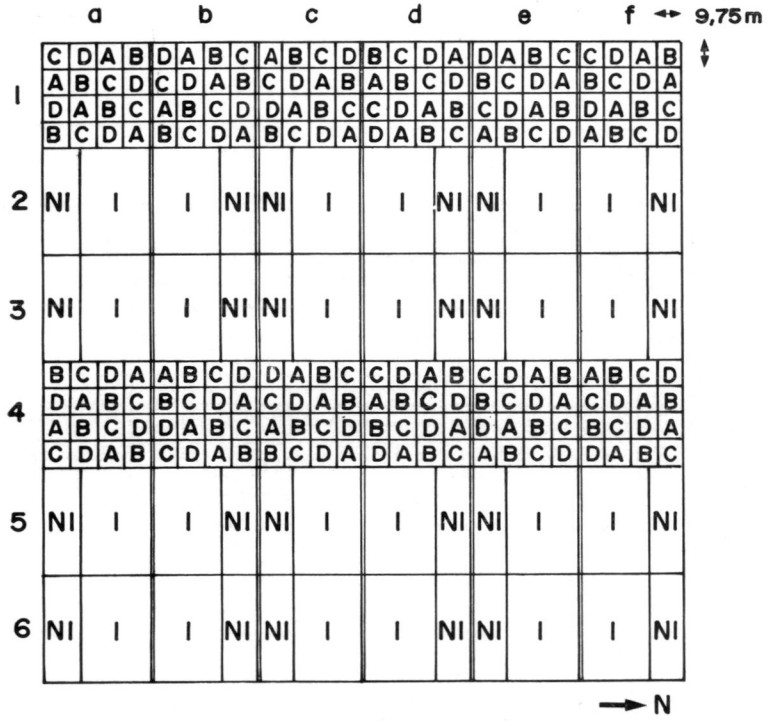
PLAN 1. — *Implantation des soles figurant les types de rotation*



PLAN 2. — *Implantation des soles figurant les variantes de rotation*



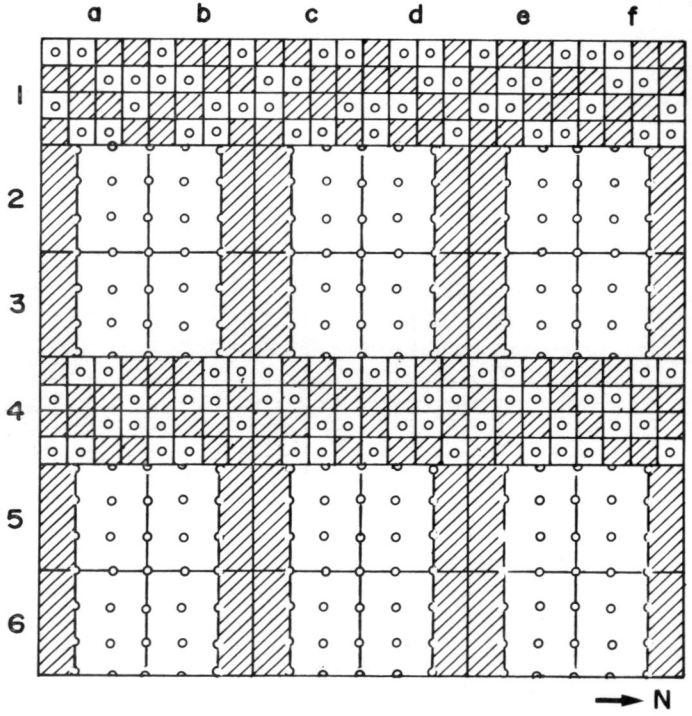
PLAN 3. — *Année de début des rotations pour les différentes soles*



PLAN 4. — *Implantation des parcelles de traitement*

A : NI, NE
B : NI, E
C : I, NE
D : I, E

I : irrigué
NI : non irrigué
E : enfoui
NE : non enfoui



PLAN 5. — *Implantation de l'irrigation*

○ : arroseur
//// : surface non irriguée

3. 2. *Dispositif concernant l'irrigation et l'enfouissement.*

La quantité d'eau est calculée de manière à combler le déficit lorsque ce dernier, évalué à partir de la formule du Piche corrigé (Bouchet) atteint théoriquement 30 à 40 mm. L'irrigation est appliquée différemment selon les variantes de rotation. Sur les soles de variante 1 des types 1 (sans luzerne) et 2 (avec luzerne), ce facteur est combiné à l'enfouissement des résidus de récolte. Quatre traitements (A : non irrigué, non enfoui ; B : non irrigué, enfoui ; C : irrigué, non enfoui ; D : irrigué, enfoui) sont répétés 4 fois. Seize parcelles (de 9,75 × 9,75 m = 760,5 m²) sont disposées en carré latin sur chacune des soles (voir plan 4). Par résidus de récolte, il faut entendre : fanes de maïs, pailles de céréales et dernière coupe de luzerne. Un apport complémentaire de 50 unités d'azote évite les effets dépressifs immédiats dus à l'enfouissement des résidus de céréales. L'apport d'eau est assuré à l'aide d'un diffuseur « Perrot NK » placé au centre de la parcelle et fonctionnant sous une pression de 1,5 kg/cm² (voir plan 5). Les 2/3 de la surface des soles de variante 2 et 3 sont irrigués. Il n'y a ici que deux traitements : I et NI (remarque : en 1966, l'ensemble de la surface était irrigué). 4 prélèvements (3 par coupe de luzerne) par parcelle de traitement sont effectués au hasard, d'est en ouest). Des arroseurs « Perrot ZA 30 » à secteur, placés en carré à 13 m de distance et fonctionnant sous une pression de 2,5 kg/cm² assurent la répartition de l'eau. Ils sont montés sur traineaux et reliés aux éléments secondaires du réseau d'amenée à l'aide de tuyaux souples.

4. — *Conduite des essais et recueil des données*

4. 1. *Sol et techniques.*

4. 11. *Conditions agronomiques locales.*

Profondeur du sol : 60 cm
Pourcentage de cailloux : 50
Pente du terrain : pratiquement nulle
Vitesse de filtration : 3×10^{-3} m/s
Densité apparente : 1,4
Humidité à la capacité de rétention : 14,4 p. 100
Humidité au point de flétrissement : 6,6 p. 100
Réserve utile : 32 mm

	0-20 cm	20 à 40 cm
Argile	11,1	11,9
Limon	13,9	11,4
Sable fin	45,2	45,1
Sable grossier	26,4	29,8

	0-25 cm	25-50 cm
Calcaire total (p. 100)	0,79	1,38
Matière organique (p. 100)	2,29	1,91
pH	7,31	7,50
Carbone organique (p. 1 000)	13,41	11,69
Azote total (p. 1 000)	1,33	1,19
P_2O_5 assimilable (C) (p. 1 000)	0,29	0,23
K_2O échangeable (p. 1 000)	0,17	0,14

4. 12. *Conditions culturales.*

Variétés et semences utilisées :

Maïs grain	*INRA 300*	23 kg/ha
Blé dur	*Montferrier*	197 kg/ha
Orge	*Certa*	110 kg/ha
Pois	*Alaska 163*	225 kg/ha
Haricot	*Processor*	141 kg/ha
Colza	*Regina II*	8 kg/ha
Blé d'hiver	*Moisson*	156 kg/ha
Luzerne	*FD 100*	9 kg/ha

Écartement, densité et date de semis de plantation :

Maïs grain	70/18 cm	7 pl/m²	fin avril
Blé dur	17,3-18 cm	350 pl/m²	début mars
Orge	17,3-18 cm	250 pl/m²	début mars
Pois	17,3-18 cm	130 pl/m²	début avril
Haricot	40/18 cm	53 pl/m²	mi-juillet
Colza	25/18 cm	110 pl/m²	fin mars
Blé d'hiver	17,3-18 cm	250 pl/m²	mi-octobre
Luzerne	17,3-18 cm	566 pl/m²	début septembre

Fumures utilisées (kg/ha) :

Maïs grain	60 + 150-180-180
Blé dur	110-180-180
Orge	110-180-180
Pois	30-180-180
Haricot	50-50-100
Colza	120-180-180
Blé d'hiver	60 + 50-180-180
Luzerne 1	50-210-210
Luzerne 2 à 4	0-140-140

4. 2. *Observations en cours de végétation.*

Le souci d'homogénéité dans la conduite des essais se traduit par certaines difficultés dans l'approvisionnement en semences de maïs *INRA 300* par exemple. Les travaux culturaux sont effectués tous les ans ; en principe de la même manière et à des dates identiques. Des variations inévitables impliquent que nous notions la densité du semis, la dose exacte d'engrais... et les dates effectives de réalisation des travaux.

Les relevés météorologiques, effectués tous les jours au poste d'observation situé sur les terrains, permettent de sérier les conditions climatiques déterminantes et de conduire les irrigations en cours de campagne.

Les relevés d'ordre pathologique et parasitaire sont effectués par traitement, avec l'aide des stations de Zoologie et de Pathologie de Colmar.

Les autres observations portent principalement sur la densité de peuplement, le nombre d'épis par pied, les dates de réalisation de quelques stades phénologiques. Pour des raisons financières, la surveillance des exportations et des restitutions en éléments minéraux a dû être abandonnée. Nous avions également prévu de réaliser tous les 4 ans des analyses de terre et des mesures de stabilité structurale.

4. 3. *Observations à la récolte.*

En variante 1, l'ensemble de la parcelle est récoltée après « détourage ». En variantes 2 et 3, on effectue 4 pesées géométriques par parcelle (14 m² au total). Dans tous les cas, les données suivantes sont relevées : nombre de pieds, nombre d'épis, poids des fanes, poids d'épis, poids de grains, poids de rafles. Des échantillons sont prélevés et la détermination de l'humidité par gravimétrie permet de traduire le rendement en matière sèche et en grain à 15 p. 100 d'humidité.

4. 4. *Expression des résultats.*

Les fiches (une par sole, par année et par culture ; cf. tabl. 2) sont dépouillées statistiquement de manière à faire apparaître par traitement (A, B, C, D ou I et NI) les rendements humide et sec du grain, de la paille et des rafles, le pourcentage d'humidité à la récolte, la signification de l'effet des traitements et en variante 1 de l'interaction (I × E) (voir plan 6 pour le grain à 15 p. 100). L'ensemble de ces résultats préliminaires est reporté sur d'autres fiches (une par culture et par année). En fait, si les options I et NI sont immédiatement distinctes, il n'en est pas de même pour tous les facteurs. C'est ainsi, par exemple, qu'il faut attendre 5 ans sur maïs pour que $T_2 V_2$ soit distinct de $T_2 V_3$, tous deux précédés de 4 années de luzerne. Un deuxième jeu de fiches tient compte de ces absences de différenciation par report de valeurs moyennes. Ce sont certaines de ces données (rendement grain 15 p. 100, rendement paille sèche, rendement total sec) qui font l'objet d'un dépouillement plus poussé.

TABLEAU 2. — *Fiche de résultats*

Résultats sur MAÏS *en 19..*

semis le : ..... nombre de j. de végétation : ..... pluviométrie : ..... récolte : .....

levée le : ..... (de la levée à la récolte) (levée à récolte) E.T.P. j-l :

(du recouvrement à la récolte)

essais					rendements										notations agronomiques					zoo-pathologiques						biolog.		physiol. dates			
types	variations	années	traitements	soles	rdt grain hum.	% humid. grain	rdt grain 15 %	rdt grain sec	rdt paille hum.	% humid. paille	rdt paille sec	rdt total sec	hauteur végét.	densité pl/m²	nbre épis/pied	M. O. sol	exportations totales N, P_2O_5, K_2O	restitution N, P_2O_5 K_2O	pyrale	charbon	fusariose	gyberella	divers	adventices	eau d'irrigat. (mm)	eau utilisée (mm)	recouvrem. (6 f)	sortie panicule	émission pollen	grain laiteux
1	I	1	A																											
—	—	—	B																											
—	—	—	C																											
—	—	—	D																											
1	I	2	A																											
—	—	—	B																											
—	—	—	C																											
—	—	—	D																											
2	I	1	A																											
—	—	—	B																											
—	—	—	C																											
—	—	—	D																											
2	I	2	A																											
—	—	—	B																											
—	—	—	C																											
—	—	—	D																											
1	II		I																											
—	—		NI																											
2	II		I																											
—	—		NI																											
1	III		I																											
—	—		NI																											
2	III		I																											
—	—		NI																											

Observations diverses :

		cultures	sig. trait.	lignes	colonnes	irrig.	enfou.	irrig. × enfou.	cultures	sig. trait.	lignes	colonnes	irrig.	enfou.	irrig. × enfou.	cultures	sig. trait.	lignes	colonnes	irrig.	enfou.	irrig. × enfou.
V1	1966	LUZ	**	*	/	**	/	*	M	*	/	/	**	/	/	M	*	/	/	**	/	/
	67	M	**	/	/	**	/	/	M	**	/	/	**	/	/	B.D.	**	/	/	**	/	/
	68	M	/	*	/	/	/	*	B.D.	**	/	/	**	/	/	O	/	*	/	*	/	/
	69	B.D.	/	/	/	/	/	/	O	/	*	/	/	/	/	M	**	/	/	**	/	/
	70	O	*	/	/	*	*	/	M	**	/	/	**	/	/	M	**	**	**	**	/	/
	71	LUZ	**	*	/	**	*	*	M	**	*	/	**	/	/	B.D.	*	/	/	*	**	/
	72	LUZ	**	/	/	**	/	/	B.D.	*	/	/	*	/	/	O	/	/	/	**	**	/
	73	LUZ							O							M						
V2	1966	LUZ							M							P						
	67	M	**	/					P	/	/					C	/	/				
	68	P	/	/					C	*	/					B.H.	/	/				
	69	C	/	/					B.H.	/	/					M	/	/				
	70	B.H.	/	/					M	**	/					P	*	/				
	71	LUZ	/	/					P	*	/					C	/	/				
	72	LUZ	/	/					C	*	/					B.H.	/	/				
	73	LUZ							B.H.							M						
V3	1966	LUZ							M							P+H						
	67	M	**	/					P+H	**	/					B.H.	/	/				
	68	P+H	/	/					B.H.	/	/					O	/	/				
	69	B.H.	/	/	I				O	/	/					M	/	/				
	70	O	*	/					M	/	/					P+H	*	/				
	71	LUZ	*	/					P+H	*/	*					B.H.	*	/				
	72	LUZ	**	/					B.H.	/	/					O	/	/				
	73	LUZ							O							M						
V1	1966	LUZ	**	/	/	**	/	/	M	**	/	*	**	/	/	M	**	/	*	**	/	/
	67	LUZ	**	/	/	**	/	/	M	**	/	/	**	/	/	B.D.	**	*	*	**	/	/
	68	M	/	/	/	/	/	*	B.D.	**	*	/	**	/	/	O	/	/	/	/	/	/
	69	M	*	*	/	**	/	/	O	/	/	/	/	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/
	70	B.D.	/	/	/	/	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/	LUZ	**	*	/	**	/	/
	71	O	/	/	/	/	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/	LUZ	/	/	*	/	/	/
	72	LUZ	**	/	/	**	/	/	LUZ	/	/	*	/	/	/	LUZ	**	/	/	**	*	/
	73	LUZ							LUZ							M						
V2	1966	LUZ							M							P						
	67	LUZ	**	/					P	/	/					C	/	/				
	68	M	/	/					C	**	/					B.H.	/	/				
	69	P	/	/					B.H.	/	/					LUZ	**	*				
	70	C	**	/					LUZ	**	/					LUZ	*	/				
	71	B.H.	*	/					LUZ	**	*					LUZ	/	/				
	72	LUZ	**	/					LUZ	/	/					LUZ	*	/				
	73	LUZ							LUZ							M						
V3	1966	LUZ							M							P+H						
	67	LUZ	**	/					P+H	**	/					B.H.	/	/				
	68	M	/	/					B.H.	/	/					O	/	/				
	69	P+H	/	/					O	/	/					LUZ	*	/				
	70	B.H.	/	/					LUZ	/	/					LUZ	**	/				
	71	O	/	/					LUZ	/	/					LUZ	/	/				
	72	LUZ	**	*					LUZ	/	/					LUZ	/	/				
	73	LUZ							LUZ							M						
			a						b							c						

PLAN 6. — *Résultats concernant*

LUZ : luzerne ; M : maïs ; B.D. : blé dur ; O : orge ; B.H. : blé d'hiver ; C : colza ; P : pois ; H : haric

cultures	sig. trait.	— lignes	— colonnes	— irrig.	— enfou.	— irrig. × enfou.	cultures	sig. trait.	— lignes	— colonnes	— irrig.	— enfou.	— irrig. × enfou.	cultures	sig. trait.	— lignes	— colonnes	— irrig.	— enfou.	— irrig. × enfou.	
B.D.	**	/	/	**	/	/	O	**	/	/	**	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/	1
O	**	/	/	**	/	/	M	**	/	*	**	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/	
M	*	/	/	**	/	/	M	*	/	**	/	**	/	LUZ	**	*	/	**	/	/	
M	/	/	/	/	/	/	B.D.	/	/	/	/	/	/	M	**	/	/	**	/	/	
B.D.	/	/	/	/	/	/	O	*	/	/	**	/	/	M	*	*	/	**	/	/	
O	/	/	/	/	/	/	M	**	/	/	**	/	/	B.D.	**	/	/	/	**	/	
M	/	/	/	**	/	/	M	/	*	/	**	/	/	O	/	/	/	/	/	/	
M							B.D.							LUZ							
C							B.H.							LUZ							2
B.H.	/	/					M	**	/					LUZ	*	/					
M	/	/					P	/	/					LUZ	/	/					
P	/	/					C	/	/					M	*	/					
C	**	/					B.H.	/	/					P	*	/					
B.H.	**	/					M	*	/					C	/	/					
M	/	/					P	/	/					B.H.	/	/					
P							C							LUZ							
B.H.							O							LUZ							3
O	*	/					M	**	/					LUZ	*	/					
M	/	/					P+H	/	/					LUZ	/	/					
P+H	/	/					B.H.	/	/					M	**	/					
B.H.	/	/					O	/	/					P+H	*/	/					
O	/	/					M	*	/					B.H.	*	/					
M	/	/					P+H	**	/					O	/	/					
P+H							B.H.							LUZ							
B.D.	/	/	/	**	/	/	O	**	/	/	**	/	/	LUZ	**	*	/	**	/	/	4
O	**	**	/	**	/	/	LUZ	**	/	*1	*	/	/	LUZ	**	/	/	**	/	/	
LUZ	**	*	/	**	**	/	LUZ	/	/	/	*	/	/	LUZ	/	*	/	/	/	/	
LUZ	/	/	/	/	/	/	LUZ	*	/	/	/	/	/	LUZ	**	*	/	**	/	/	
LUZ	**	*	/	**	/	/	LUZ	*	/	*	**	/	/	M	**	**	/	**	/	/	
LUZ	**	*	*	**	/	*	M	**	/	/	**	/	/	M	**	**	/	**	*	/	
M	/	/	/	*	/	/	M	*	/	/	**	/	/	B.D.	**	/	/	**	*	/	
M							B.D.				**			O							
C							B.H.							LUZ							5
B.H.	**	/					LUZ	**	/					LUZ	**	*					
LUZ	*	/					LUZ	/	/					LUZ	/	/					
LUZ	/	/					LUZ	**	*					LUZ	/	/					
LUZ	/	/					LUZ	/	/					M	/	/					
LUZ	*	/					M	**	*					P	**	/					
M	**	/					P	/	/					C	**	**					
P							C							B.H.							
B.H.							O							LUZ							6
O	/	/					LUZ	*	/					LUZ	*	/					
LUZ	/	/					LUZ	/	/					LUZ	/	/					
LUZ	/	/					LUZ	*	/					LUZ	*	/					
LUZ	*	/					LUZ	*	/					M	*	/					
LUZ	*	/					M	**	/					P+H	*	/					
M	/	/					P+H	*	/					B.H.	**	/					
P+H							B.H.							O							

d e f

rtie consommable des cultures

+H : pois suivis de haricot ; * : significatif ; / : non significatif ; ** : hautement significatif

III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — *Homogénéité du sol*

Dans un tel dispositif, la disposition annuelle des soles n'est pas le fait du hasard et il importe de tester l'homogénéité du sol. N'ayant malheureusement pas eu de culture uniforme sur l'ensemble du champ avant la mise en place des rotations, nous ne pouvons contrôler cette homogénéité que, d'une part, au niveau des soles, et ceci chaque année, et d'autre part, en 1966 et 1967, entre les soles suffisamment contiguës portant la même culture.

Au niveau des soles, le contrôle se résume à l'analyse de la signification des lignes et des colonnes en variante 1, des lignes en variante 2 et 3. Les résultats concernant la partie consommable des cultures sont présentés sur le plan 6. Pour la luzerne, il s'agit du total sec annuel mais l'analyse a de plus porté sur chacune des coupes. Pour les céréales, le maïs et le colza, il s'agit du rendement en grain à 15 et 9 p. 100 mais l'analyse qui a également porté sur la paille ne modifie pas les résultats. L'hétérogénéité Nord-Sud est négligeable et il en est de même en Est-Ouest sauf sur les soles d_4 et f_4 où des variations interannuelles anormales de rendement en $T_2 V_1$ pourraient être expliquées.

Vingt calculs de régression entre rendements des soles ont pu être effectués. Trois seulement se sont révélées significatives. Elles sont cependant toutes situées en colonne « *a* » où la fertilité semble décroître d'Ouest en Est. Elle a tendance à favoriser la variante 1, mais comme le rendement du maïs en variante 1 n'est pas supérieur aux autres, ceci ne risque pas de remettre en cause les conclusions : l'étude des résultats peut donc être poursuivie.

2. — *Possibilités de regroupement des résultats. Interactions*

L'analyse statistique a d'abord porté sur l'interprétation des carrés latins (pour le maïs : 56 en variante 1) et des blocs (48 en variante 2 et 3). Nous aboutissons à l'analyse détaillée de l'effet des facteurs « Irrigation » et « Enfouissement ». Pour avoir une vue globale de l'effet de ces facteurs (et des autres), il est nécessaire de regrouper les options « balancées ». L'étude de l'effet d'un facteur, toutes choses égales par ailleurs, est possible dans la mesure où il n'y a pas d'interaction entre ce facteur et les autres dont on désire confondre les actions.

Toutes les possibilités d'interaction du premier et du second degré entre traitements ont été étudiées. Elles sont des formes :

— premier degré (Irrigation × Enfouissement)... etc.
(Enfouissement × Type de rotation)... etc.
— deuxième degré (Type de rotation × Irrigation × Enfouissement)... etc.

Elles ne sont généralement pas significatives en dehors de trois cas :

Le premier cas de signification se manifesta de manière fugace en 1966 et en 1969 entre les traitements Irrigation et Enfouissement de résidus, essentiellement sur les rendements en paille. On peut cependant discuter la validité de cette observation car, en 1966, il n'y avait, pour le deuxième traitement, aucune cause contrôlée

de variation. Il s'agit vraisemblablement, et malgré le niveau élevé des valeurs de F calculées ($P < 0,01$), d'un effet aléatoire : 2 cas de signification sur 96.

Le second est également fugace, mais il concerne plusieurs interactions qui prennent une importance particulière, en 1969, alors que les effets des facteurs principaux (hormis l'irrigation), n'atteignent pas le seuil de signification sur l'ensemble des dispositifs.

Ces interactions sont les suivantes :

(type de rotation × irrigation)
(type de rotation × variante)
(type de rotation × irrigation × variante).

cette constatation nous amènera à raisonner de façon particulière l'effet des facteurs T et V, pour cette année.

Le troisième est plus intéressant car son mode de manifestation est beaucoup plus constant. Il met en jeu les facteurs type de rotation (absence ou présence de luzerne) et 1re et 2e culture de maïs (P) dans la variante céréalière. Les valeurs de F calculées, évoluent, au cours des années, de la manière suivante :

1966		1967		1968		1969		1970		1971		1972	
Grain	Paille	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P
1,73	2,14	8,63	13,40	4,35	0,10	25,94	70,80	6,11	12,98	5,24	6,97	4,95	2,28

Valeurs limites de F = P 0,05 = 4.04
P 0,01 = 7,19

Dans tous les cas, exception faite de 1966, et pour la production de grain, l'effet d'interaction se manifeste significativement à $P \leqslant 0,05$ et l'est 2 fois à $P \leqslant 0,01$. On note qu'il est statistiquement plus assuré sur la production de paille lorsque sa probabilité de manifestation sur la production de grain est très élevée.

Sur le plan statistique, cette observation nous impose de séparer les facteurs P_1 et P_2 (maïs en 1re ou 2e paille) pour analyser l'effet du précédent luzerne, et de séparer également les facteurs type de rotation avec ou sans luzerne, pour étudier l'effet de l'année de culture (1re ou 2e) sur le maïs test.

Sous l'angle agronomique, cela veut dire que le fait de faire revenir un maïs sur lui-même ne se traduit pas par des effets similaires selon que l'on se trouve dans une rotation céréalière ininterrompue ou entrecoupée par une luzernière.

3. — *Effets principaux*

Il est possible d'étudier statistiquement l'effet de chaque facteur en considérant les options du facteur en question comme des traitements et les options des autres facteurs comme des répétitions dans les limites définies dans le paragraphe précédent.

Ces répétitions sont nombreuses lors de l'analyse globale, et elles se réduisent au fur et à mesure de la séparation des facteurs secondaires ; 996 « essais blocs » ont ainsi été analysés.

En ce qui concerne l'irrigation et l'enfouissement, nous avons déjà étudié la représentativité des valeurs moyennes retenues au niveau des soles (plan 6 pour le grain). Sur un plan plus général, la signification des effets principaux est exprimée dans le tableau 3. On note qu'au fur et à mesure que l'essai se poursuit, l'effet « Type de rotation » a tendance à s'affirmer, alors que l'enfouissement n'a pas d'action notable dans le laps de temps considéré.

TABLEAU 3

Signification des effets principaux

Traitements	1967		1968		1969		1970		1971		1972	
	grain	paille	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P
Ensemble du dispositif												
Irrigation.....	*TS*	NS	S	NS	*TS*	*TS*	*TS*	NS	*TS*	*TS*	*TS*	*TS*
Type de rotation (présence de luzerne)	S	*TS*	NS	NS	NS	NS	*TS*	S	*TS*	*TS*	*TS*	*TS*
Variante (succession des cultures annuelles) ...	NS	NS	NS	S	NS	S	S	S	NS	NS	NS	NS
Sur variante 1												
Enfouissement { I	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Enfouissement { NI....	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS : non significatif.
S : significatif $0{,}05 \geqslant P \geqslant 0{,}01$.
TS : très significatif $P \leqslant 0{,}01$.

3. 1. *Effet de l'irrigation* (tabl. 4, 5 et 6 ; fig. 1, 2 et 3).

En moyenne, avec irrigation, le rendement en grain du maïs passe de 45 à 71 q/ha. Dans le premier cas, la culture est à peine rentable (frais de culture équivalents au produit brut de 36 q/ha) ; dans le deuxième, les frais d'irrigation (coûtant environ la valeur de 16 q/ha) sont largement couverts. Une moyenne sur si peu d'années ne signifie en fait pas grand chose puisque selon les années, mais aussi les rotations, l'augmentation de rendement dûe à l'irrigation varie de 4 à 69 quintaux. Bien que le premier chiffre ait été obtenu en année « humide » (1968) et le second en année « sèche » (1967) (tabl. 4), la quantité d'eau utilisée, et même sa répartition, n'expliquent pas tout.

L'irrigation maintient un niveau élevé de production. Les variations interannuelles de rendement du maïs irrigué sont faibles (fig. 1). En l'absence d'irrigation, le rendement est si fluctuant qu'il ne rentabilise pas la culture tous les ans.

TABLEAU 4

Conditions climatiques

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Nbre j végét. l à R	Pluies l à R	ETP r à R	I	eau utilisée NI	eau utilisée I	h l à R	Nbre j ⩾ 4 r à R mm ETP	1-8	Nbre j Pl. s à R	Nbre Pl. ♂ à R
1967	142	296	420	201	202	379	105,3	43	99	57	28
1968	150	347	390	130	199	328	91,8	37	113	56	30
1969	137	233	332	145	116	251	90,8	31	106	44	14
1970	144	244	362	110	193	304	98,5	34	110	50	17
1971	137	318	360	109	136	249	108,4	42	95	49	21
1972	149	247	352	120	247	367	100,4	36	113	44	14
Moy. de 70 à 72	143	270	358	113	192	307	102,4	37	106	48	17

s : semis ; l : levée ; r : recouvr. ; R : récolte ; ♂ : émission pollen.

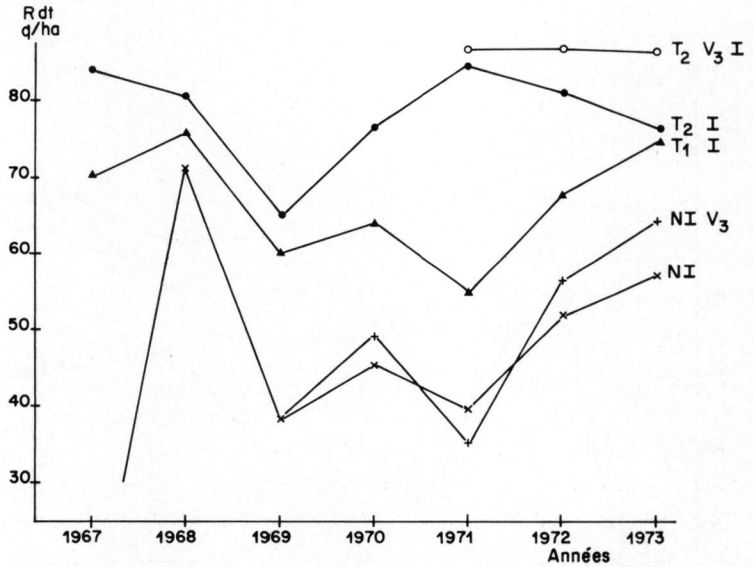


FIG. 1. — *Effet de l'irrigation sur maïs avec* (T_2) *ou sans luzerne* (T_1) *dans la rotation, plus particulièrement en variante légumière de rotation* (V_3)

I = irrigué NI = non irrigué

● irrigué avec luzerne
○ irrigué avec luzerne var. légum.
▲ irrigué sans luzerne
× non irrigué
\+ non irrigué var. légum.

FIG. 2. — *Effet de l'irrigation* (I) *avec* (T_2) *ou sans luzerne* (T_1) *dans la rotation, en variante céréalière, sur maïs de première paille* (1re p.)

● irrigué avec luzerne
○ irrigué sans luzerne
□ non irrigué

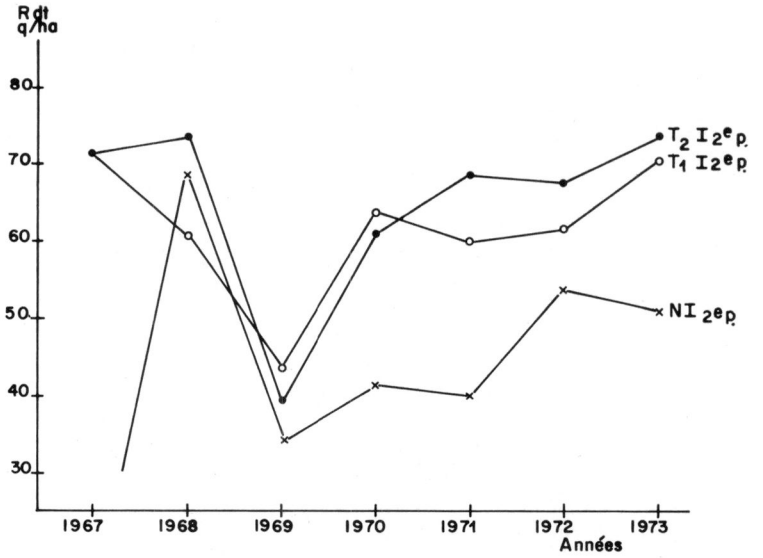


FIG. 3. — *Effet de l'irrigation* (I) *avec* (T_2) *ou sans luzerne* (T_1) *dans la rotation, en variante céréalière, sur maïs de deuxième paille* (2e p.)

● irrigué avec luzerne
○ irrigué sans luzerne
× non irrigué

TABLEAUX 5

Effet de l'irrigation sur l'ensemble des variantes

	Grain 15 p. 100		Total sec	
	NI	I	NI	I
1967	10,7	76,3**	53,7	114,2**
1968	71,1	78,2**	113,0	123,5**
1969	38,3	62,5**-	65,8	94,4**
1970	44,6	69,8**	82,5	103,0**
1971	39,0	69,4**	70,0	107,4**
1972	52,2	73,2**	96,4	131,3**
Moy. de 70 à 72	45,2	70,8**	83,0	115,9**

a

	I-NI			
	Grain 15 p. 100		Total sec	
	T_1	T_2	T_1	T_2
1967	62,5**	68,8**	59,6*	61,5**
1968	8,2	5,7**	10,2	10,3**
1969	16,9	31,6**	23,3	33,9**
1970	22,4*	28,1**	19,2	33,7**
1971	22,3*	38,5**	31,4*	43,3**
1972	19,8*	22,2**	31,3	38,4*
Moy. de 70 à 72	21,5	— 9,6**	27,3*	38,5**

b

	Grain 15 p. 100			Total sec		
	I-NI					
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
1967	65,1*	66,7*	65,1*	60,5*	60,7**	60,5*
1968	7,2	8,9	4,6	11,4*	14,7	5,3
1969	26,2	20,2	26,3	28,4	22,8	34,6*
1970	27,0*	25,9	22,9	32,4*	26,6	20,4
1971	27,4	34,0*	29,8	31,9	46,3	33,9
1972	18,6	25,1*	19,4	27,4	48,8**	28,4*
Moy. de 70 à 72	24,3	28,3*	24,0	30,5	40,6	27,6

c

	I-NI											
	$T_1 V_1$	$T_1 V_2$	$T_1 V_3$	$T_2 V_1$	$T_2 V_2$	$T_2 V_3$	$T_1 V_1$	$T_1 V_2$	$T_1 V_3$	$T_2 V_1$	$T_2 V_2$	$T_2 V_3$
Moy. de 70 à 72	19,0	27,4	18,2	29,7	29,3	29,9	23,6	36,7	21,6	37,5	44,4	33,5
	grain 15 p. 100						total sec					

d

TABLEAUX 6

Effet de l'irrigation en variante 1

(différences des rendements parcelles irriguées-non irriguées)

	I-NI							
	Grain 15 p. 100				Total sec			
	$T_1 P_1$	$T_1 P_2$	$T_2 P_1$	$T_2 P_2$	$T_1 P_1$	$T_1 P_2$	$T_2 P_1$	$T_2 P_2$
1967	62,2**	66,1*	72,9*	66,1*	55,2*	67,2	64,9*	67,2
1968	10,2	— 2,8	0,7	— 0,4	17,4	— 6,8	6,1	4,3
1969	16,1	5,0	26,9	9,4	18,0	1,7	29,6	11,4
1970	26,7*	25,6*	27,1	14,0	31,4**	17,0	35,2*	15,5
1971	11,0	24,3*	39,7**	23,7*	17,5	31,2*	37,4*	29,8
1972	15,4*	6,0**	13,6	18,1	15,5**	15,5*	24,7	41,1*
Moy. de 70 a 72	17,6*	18,6*	26,8*	18,6	21,5*	21,2	32,5	28,8*

a

	$T_1 P_1$ NE	$T_1 P_1$ E	$T_1 P_2$ NE	$T_1 P_2$ E	$T_2 P_1$ NE	$T_2 P_1$ E	$T_2 P_2$ NE	$T_2 P_2$ E	$T_1 P_1$ NE	$T_1 P_1$ E	$T_1 P_2$ NE	$T_1 P_2$ E	$T_2 P_1$ NE	$T_2 P_1$ E	$T_2 P_2$ NE	$T_2 P_2$ E
Moy. de 70 a 72	16,3	19,0	17,9	19,2	23,9	29,7	20,9	16,3	19,3	23,6	24,7	17,7	27,4	37,5	28,1	29,5
	I-NI grain 15 p. 100								I-NI total sec							

b

L'implantation d'une luzerne dans la rotation permet au maïs qui suit de mieux valoriser l'eau d'irrigation (tabl. 5 *b*). Il en est de même, à la longue, de l'introduction d'une culture industrielle (tabl. 5 *c*). Les arrière-effets de la luzerne et du colza sont complémentaires sur la paille mais non sur le grain (tabl. 5 *d*). A l'examen des différences « I-NI » obtenues en variante céréalière, nous pouvons dire que la valorisation de l'eau dûe au précédent « luzerne » disparaît très vite. Elle ne s'observe plus sur maïs de deuxième année (tabl. 6 *a*). Cet arrière effet est vraisemblablement imputable à une meilleure nutrition d'autant plus qu'en première culture, après luzerne, l'enfouissement des résidus de récolte renforce cette action et plus particulièrement se répercute sur le rendement en matière sèche totale (tabl. 6 *b*).

En conclusion, dans les conditions de nos champs d'essais, l'irrigation du maïs est impérative et gagne à être accompagnée, le plus souvent possible, de mesures tendant à améliorer la nutrition de la culture.

3. 2. *Effet « Type de rotation »* (introduction de la luzerne) (tabl. 7 et 8).

Mise à part l'année 1969 où, comme nous l'avons vu, nous devons considérer séparément les diverses variantes de rotation à cause de l'interaction « T × V », il y eut toujours, en absence de luzerne, de plus faibles rendements. Cependant, cette diminution de production du maïs s'accentue d'année en année sur le grain et la paille. Depuis 1970, la différence de végétation s'observe à l'œil nu : dès le stade « 10 feuilles», une apparence de carence en zinc se manifeste sur maïs en type 1 de rotation.

Compte tenu des importantes différences de rendement, relevées précédemment, entre le maïs irrigué et le maïs non irrigué, il est bon de distinguer les deux hypothèses bien qu'il n'y ait pas interaction (sauf en 1969). En l'absence d'irrigation, l'effet « luzerne » est évalué à 12 quintaux sur les trois dernières années et s'élève dans les mêmes conditions à 20 quintaux (et même à 30 q en 1971) en conditions irriguées. Nous avons vu précédemment que la luzerne assure une meilleure valorisation de l'irrigation du maïs ; inversement, l'irrigation accentue l'effet bénéfique de l'introduction d'une luzernière et limite la chute de rendement due à son absence (tabl. 7 *c*). La luzerne apparaît ainsi, à la longue, pour le maïs, comme un excellent conditionneur de sol, particulièrement dans le cas de rotations épuisantes (V_3) ou dégradantes (V_1). En rotation comportant des cultures légumières, les effets fluctuent énormément selon les conditions climatiques de l'année (interactions T × V et I × T × V en 1969) ; en rotation typiquement céréalière, l'effet bénéfique est plus stable (tabl. 7 *d* et fig. 4). Le rôle de la luzerne serait à la fois chimique (domine en V_3) et physique (domine en V_1).

Lorsque nous comparions les variantes entre elles, nous ne considérions en V_1 que le maïs de 1re année. L'effet « luzerne », bien qu'encore significativement positif en deuxième paille sur la moyenne des trois dernières années, est cependant très faible (tabl. 8 *a*). Pratiquement, en V_1, un effet valable de la luzerne ne s'observe qu'en première paille irriguée (interaction T × P × I en 68 et 71 ; tabl. 8 *b* et fig. 5) et ceci est légèrement plus marqué avec enfouissement des résidus de récolte, du moins pour le grain (tabl. 8 *c*).

En conclusion, l'implantation d'une culture de type « luzerne » dans la rotation est d'autant plus nécessaire à la culture du maïs que l'irrigation a été retenue ; elle peut s'avérer indispensable selon le succession choisie de cultures annuelles.

TABLEAUX 7

Effet luzerne sur l'ensemble des variantes

	Grain 15 p. 100		Total sec	
	T_1	T_2	T_1	T_2
1967	38,5	48,6**	74,5	93,4**
1968	72,1	77,4**	119,9	116,7
1969	51,8	49,0	81,1	79,1
1970	51,6	62,8**	88,2	103,3*
1971	43,3	65,0*	71,5	105,9**
1972	55,8	69,5**	101,2	126,4**
Moy. de 70 a 72	50,2	65,7**	87,0	111,9**

a

	Grain 15 p. 100				Total sec			
	NI		I		NI		I	
	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
1967	7,2	14,2	69,7	83,0	44,7	62,7	104,3	124,2
1968	68,0	74,6	76,2	80,3	114,8	111,3	125,0	122,1
1969	43,4	33,2	60,3	64,8	69,4	62,2	92,7	96,1
1970	40,4	48,8	62,8	76,9	78,6	86,5	97,8	120,2
1971	32,2	45,8	54,5	84,3	55,8	84,3	87,3	127,6
1972	45,9	58,4	65,8	80,6	85,6	107,2	116,9	145,6
Moy. de 70 a 72	39,5	51,0	61,0	80,6	73,3	92,6	100,6	131,1

b

	T_2-T_1			
	Grain 15 p. 100		Total sec	
	NI	I	NI	I
1967	7,0*	13,3**	18,0	19,9**
1968	6,6	4,1**	— 3,5	2,9
1969	— 10,2	4,5	— 7,2	3,4
1970	8,4	14,1*	7,9*	22,4*
1971	13,6	29,8	28,4*	40,3*
1972	12,4	14,8	21,6	28,7
Moy. de 70 à 72	11,6*	19,6*	19,3*	30,5*

c

	Grain 15 p. 100			Total sec		
	T_2-T_1					
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
1967	9,4*	11,5	9,4	17,9*	20,9*	17,9*
1968	4,1	7,1	3,6	11,8*	— 21,4	0
1969	5,4	— 8,0	— 6,0	11,9	— 5,4	— 12,4*
1970	16,9*	11,0	5,7	26,6*	— 10,9	7,8
1971	20,0	10,7	34,5	31,8	25,9	45,5
1972	11,8	8,5	20,6	26,2	17,5*	31,9*
Moy. de 70 à 72	16,3	10,1	20,3	28,2	18,1	28,4

d

	T_2-T_1											
	V_1 NI	V_1 I	V_2 NI	V_2 I	V_3 NI	V_3 I	V_1 NI	V_1 I	V_2 NI	V_2 I	V_3 NI	V_3 I
Moy. de 70 à 72	10,9	21,6	9,1	12,9	11,6	22,0	21,3	35,2	14,2	15,9	22,5	34,4
	T_2-T_1 grain 15 p. 100						T_2-T_1 total sec					

e

TABLEAUX 8

Effet luzerne en variante 1

	T_2-T_1			
	grain 15 p. 100		total sec	
	P_1	P_2	P_1	P_2
1967	8,3	0	17,8*	0
1968	4,4	11,0**	10,4	14,3*
1969	8,7	— 6,4	17,8*	— 13,0
1970	16,5**	2,2	26,4**	— 3,5
1971	18,1	9,6**	35,1*	20,2**
1972	8,4	— 0,2	25,6*	9,0
Moy. de 70 à 72	14,3*	3,9*	29,0**	8,5

a

	T_2-T_1							
	grain 15 p. 100				total sec			
	NI P_1	I P_1	NI P_2	I P_2	NI P_1	I P_1	NI P_2	I P_2
1967	3,0	13,7*	0	0	13,0	22,7	0	0
1968	9,2	0,3	9,8	12,2	16,1	4,8	8,8	19,9
1969	3,3	14,1	— 8,6	— 4,2	12,0	23,6	— 17,9	— 8,2
1970	16,3	16,7*	8,0	— 3,6	24,5	28,3**	— 2,7	— 4,2
1971	3,7	32,5**	9,9	9,3*	25,1	25,1	20,9	19,5
1972	9,3**	7,6	— 6,3	5,8	21,0	30,3	— 3,9	21,7
Moy. de 70 à 72	9,8	18,9*	3,9	3,8	23,6	34,6*	4,8	12,3*

b

	NI NE P_1	NI NE P_2	NI E P_1	NI E P_2	I NE P_1	I NE P_2	I E P_1	I E P_2	NI NE P_1	NI NE P_2	NI E P_1	NI E P_2	I NE P_1	I NE P_2	I E P_1	I E P_2
Moy. de 70 à 72	8,7	3,3	10,9	4,4	16,3	6,3	21,6	1,4	25,9	8,7	21,3	0,8	34,0	12,1	35,2	18,8
T_2-T_1	grain 15 p. 100								total sec							

c

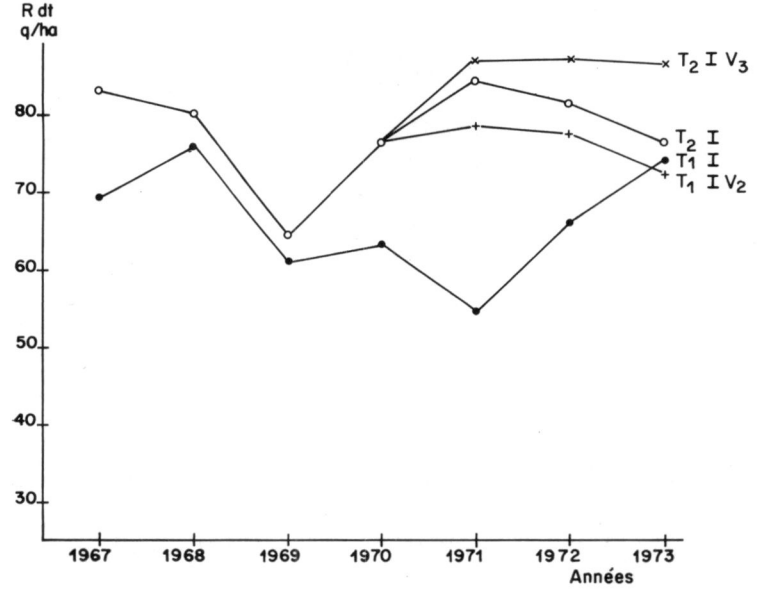


FIG. 4. — *Effet de la luzerne* (T_1 = sans, T_2 = avec luzerne) *sur maïs irrigué* (I), *plus particulièrement en variante industrielle* (V_2) *et légumière* (V_3) *de rotation*

- ● irrigué sans luzerne
- ○ irrigué avec luzerne
- × irrigué avec luzerne v. industrielle
- \+ irrigué avec luzerne v. légumière de rotation

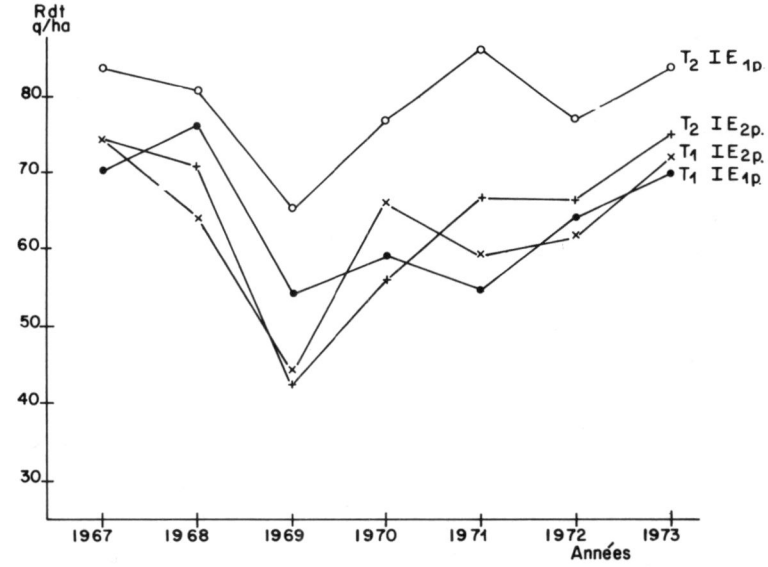


FIG. 5. — *Effet de la luzerne* (T_1 = sans, T_2 = avec luzerne) *sur maïs irrigué* (I), *avec enfouissement des résidus de récolte* (E), *en première paille* (1re p.) *et deuxième paille* (2e p.)

- ● irrigué sans luzerne, enfoui 1re paille
- ○ irrigué avec luzerne, enfoui 1re paille
- × irrigué sans luzerne, enfoui 2e paille
- \+ irrigué avec luzerne, enfoui 2e paille

3. 3. *Effet « Variante de rotation »* (tabl. 9, fig. 6).

La séquence des cultures annuelles dans laquelle s'insère le maïs n'a directement, sur ce dernier, aucun effet significatif. Tout au plus peut-on enregistrer certaines tendances qui commencèrent à s'affirmer en 1970 sur le rendement en grain pour s'estomper ensuite. Bien qu'en T_2, les variantes ne se distinguent qu'à partir de 1971, il semble qu'avec luzerne, en présence comme en absence d'irrigation, la rotation légumière (V_3) s'avère préférable (effet significatif en 72 et 73).

3. 4. *Effet de l'enfouissement* (tabl. 10).

Nous avons vu précédemment que, sous irrigation, l'enfouissement des résidus de récolte renforçait parfois l'action du précédent luzerne. Il n'a cependant, jusqu'à ce jour, aucun effet mesurable sur le maïs.

3. 5. *Effet « retour du maïs sur lui-même »* (tabl. 11, fig. 7).

La signification de l'effet direct a tendance à disparaître. Cependant, certaines interactions faisant intervenir ce facteur restent significatives. Parmi elles, il faut à nouveau évoquer l'importance de celle qui se manifeste avec le facteur « type de rotation », qui nous conduit à traiter séparément l'effet « retour du maïs sur lui-même » suivant qu'il y ait ou non présence de luzerne dans la rotation.

En l'absence de luzerne, le précédent maïs est à la longue préférable à tous les autres précédents céréaliers. Par contre, avec luzerne, l'intérêt de ne pas faire revenir le maïs sur lui-même est notable, particulièrement avec irrigation et enfouissement des résidus de récolte (fig. 7).

S'il est valable de faire maïs sur maïs en culture relativement extensive, cette pratique paraît moins justifiée lors de la recherche de rendements élevés.

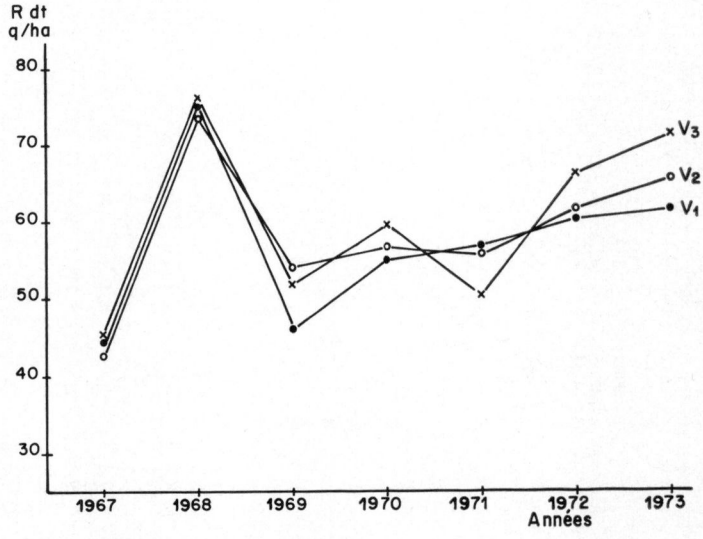


FIG. 6. — *Effet « variante de rotation »* (V) *sur le rendement de maïs*

● Variante céréalière
○ Variante industrielle
× Variante légumière

TABLEAUX 9

Effet « variante des rotations »

	Grain 15 p. 100						Total sec					
	T_1			T_2			T_1			T_2		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
1967	39,4	37,1	39,2	48,6	48,6	48,6	75,5	72,5*	75,5	93,4	93,4	93,4
1968	72,3	70,3	73,8	77,4	77,4	77,4	104,9	138,1	116,7	116,7	116,7	116,7
1969	43,6	57,0	55,0	49,0	49,0	49,0	67,2	84,5	91,5	79,1	79,1	79,1
1970	45,9	51,8	57,1	62,8	62,8	62,8	76,7	92,4	95,5	103,3	103,3	103,3
1971	47,1	50,3	32,7	67,1	61,0	67,1	76,5	75,5	62,7	108,3	101,4	108,3
1972	54,6	57,0	55,9	66,5	65,5	76,5	97,0	100,2	106,5	123,2	117,7	138,4
Moy. de 70 à 72	49,2	53,0	48,5	65,5	63,1	68,8	83,4	89,3	88,2	111,6	107,5	116,7

	V_3-V_2 = *a* V_2-V_1 = *b*							
	Grain 15 p. 100				Total sec			
	NI		I		NI		I	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
1967	1,8	— 1,8	0,2	— 0,2	1,6	— 1,6	1,4	— 1,4
1968	3,9	— 1,9	— 0,4	— 0,2	— 6,0	14,9	— 15,4	18,2
1969	— 4,1	9,7	2,0	3,7	— 2,4	11,4	9,4	5,8
1970	4,1	3,5	1,1	2,4	4,6	10,8	— 1,6	5,0
1971	— 3,7	— 4,7	— 7,9	1,8	3,2	— 11,1	— 9,1	3,2
1972	7,8	— 2,5	2,1	4,0	23,7	— 11,8	3,3	9,7
Moy. de 70 à 72	2,7	— 1,2	— 1,4	2,7	10,5	— 4,1	— 2,5	6,1

	V_3-V_2 = *a* V_2-V_1 = *b*							
	Grain 15 p. 100				Total sec			
	T_1		T_2		T_1		T_2	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
1967	— 2,1	— 2,1	0	0	3,0*	— 3,0*	0	0
1968	3,5	— 2,0	0	0	— 21,4	33,2	0	0
1969	— 2,0	13,4	0	0	7,0	17,3	0	0
1970	5,3	5,9	0	0	3,1	15,7	0	0
1971	— 17,7	3,2	6,1	— 6,1	— 12,7	— 1,0	6,9	— 6,9
1972	— 1,1	2,4	11,0*	— 1,0	6,2	3,3	20,7	— 4,5
Moy. de 70 à 72	— 4,5	3,8	5,7*	— 2,3	— 1,2	6,0	9,2	— 3,8

	T_1 NI		T_1 I		T_2 NI		T_2 I		T_1 NI		T_1 I		T_2 NI		T_2 I	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
Moy. de 70 à 72	0,1	— 0,3	— 9,1	8,0	5,4	— 2,1	6,0	— 2,6	6,4	— 0,5	— 8,7	12,6	14,6	— 7,6	3,7	— 0,7
	grain 15 p. 100								total sec							

TABLEAUX IO

Effet de l'enfouissement

	Grain 15 p. 100		Total sec	
	NE	E	NE	E
1967	40,6	40,9	80,3	84,1
1968	71,7	71,9	105,8	106,7
1969	41,9	42,4	62,2	64,6
1970	54,3	53,1	88,3	89,9
1971	53,2	54,0	86,3	87,6
1972	59,7	59,9	106,6	109,6
Moy. de 70 à 72	55,7	55,7	93,8	95,7

E-NE

Grain 15 p. 100		Total sec	
T_1	T_2	T_1	T_2
— 0'2	0,8	1,8	2,0
0,7	— 0,4	0,1	1,7
2,0	— 1,0	5,8	— 1,1
0	— 2,4	5,6	— 2,4
0,4	1,2	2,8	— 0,2
— 1,9	2,5	1,7	4,4
— 0,5	0,4	3,4	0,6

E-NE

Grain 15 p. 100		Total sec	
NI	I	NI	I
— 0,2	0,9	— 1,4	5,0
0,3	0	1,0	0,7
— 2,4	5,4	— 1,3	6,1
— 0,6	— 1,7	— 5,4	— 2,2
— 0,5	2,1	— 1,4	3,9
— 0,8	1,5	— 1,3	7,4
— 0,6	0,6	0,9	3,0

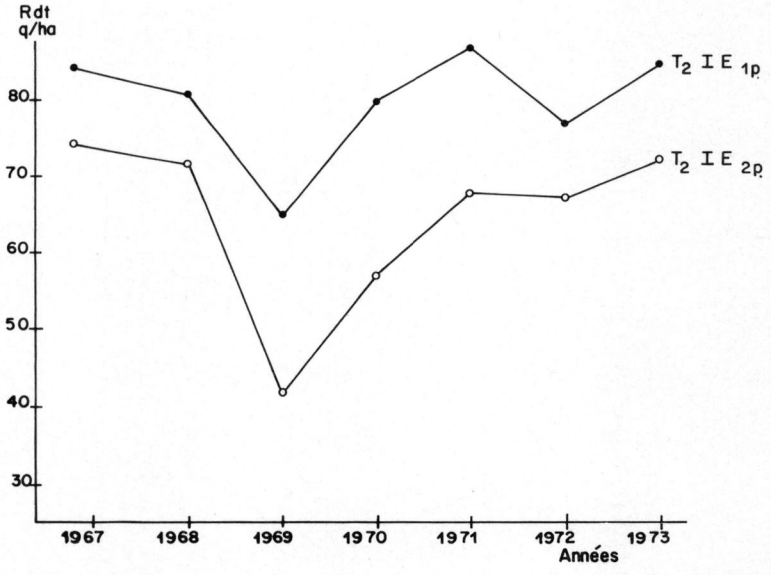


FIG. 7. — *Effet « année de culture »* (1re et 2e p.) *sur le rendement du maïs irrigué* (I) *avec luzerne dans la rotation* (T_2) *et enfouissement des résidus de récolte* (E)

● irrigué avec luzerne, 1re paille, enfouissement
○ irrigué avec luzerne, 2e paille, enfouissement

TABLEAUX II

Effet « année de culture » (en V_1)

	T_1 moy.	T_2 moy.
P_1 moy.	49,7	64,0
P_2 moy.	52,4	56,5
	grain 15 p. 100	

	T_1 moy.	T_2 moy.
P_1 moy.	82,5	111,5
P_2 moy.	88,3	96,8
	total sec	

	Grain 15 p. 100				Total sec			
	T_1		T_2		T_1		T_2	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
1967	39,0	38,4	47,3	38,4	73,9	85,6	91,4	85,8
1968	73,9	62,1	78,3	73,1	107,4	92,7	117,8	107,0*
1969	42,1	41,1	50,8	74,7	64,1	60,3	81,9	47,3*
1970	46,2	51,2**	62,7	54,1	77,1	89,7	103,5	86,2
1971	46,3	47,1	64,4	56,7	73,1	73,7	107,7	93,9*
1972	56,6	58,9	65,0	58,7	97,5	101,5	123,2	110,4
Moy. de 70 à 72	49,7	52,4**	64,0	56,5*	82,5	88,3*	111,5	96,8*

	P_1-P_2							
	Grain 15 p. 100				Total sec			
	T_1 NI	T_1 I	T_2 NI	T_2 I	T_1 NI	T_1 I	T_2 NI	T_2 I
1967	2,5	— 1,4	5,5	12,3	— 5,8	— 18,0	7,0	4,7
1968	5,3	18,3	4,7	5,8	2,6	— 26,8	9,9	11,7
1969	— 4,5	6,6	7,4	24,9	— 4,4	11,9	25,2	46,7
1970	— 6,2	— 5,1	2,0	15,2	— 19,8	— 5,4	7,4	27,1
1971	5,8	— 7,5	— 0,3	15,7	5,7	— 8,0	10,0	17,6
1972	— 7,0	2,4	8,6	4,1	— 3,9	4,0	21,0	4,6
Moy. de 70 à 72	— 2,4	3,4	3,4	11,6	— 6,0	— 5,8	12,8	16,4

	P_1-P_2							
	Grain 15 p. 100				Total sec			
	T_1 NE	T_1 E	T_2 NE	T_2 E	T_1 NE	T_1 E	T_2 NE	T_2 E
1967	0	1,1	7,4	10,5*	— 14,0	— 10,0	3,8	7,8
1968	15,5	7,9	6,8	3,7	19,8	9,7	14,9	6,7
1969	0,1	— 2,1	18,8	13,4	3,4	4,1	39,2	30,1
1970	— 5,0	— 6,3	6,1	11,2	— 6,2	— 19,0	15,3	19,2
1971	— 2,1	0,4	3,6	11,8	— 6,2	3,9	12,4	15,2
1972	— 0,3	4,3	5,9	6,7	— 1,2	— 6,7*	17,2	8,3
Moy. de 70 à 72	— 2,5	3,4*	5,2	9,9	— 4,5	— 7,3	15,0	14,2

	T_1 NI NE	T_1 NI E	T_1 I NE	T_1 I E	T_2 NI NE	T_2 NI E	T_2 I NE	T_2 I E	T_1 NI NE	T_1 NI E	T_1 I NE	T_1 I E	T_2 NI NE	T_2 NI E	T_2 I NE	T_2 I E
Moy. de 70 à 72	— 1,6	— 3,3	— 3,3	— 3,5	3,7	3,2	6,7	16,6	— 1,8	— 10,2	— 7,2	— 4,3	15,3	10,3	14,6	18,2
	P_1-P_2 grain 15 p. 100								P_1-P_2 total sec							

IV. — CONCLUSIONS

— L'apport d'eau complémentaire maintient un niveau élevé de production et cela justifie non seulement l'équipement à l'irrigation mais la pratique même de la culture du maïs dans la Hardt.

— Il apparaît qu'une rotation céréalière ne permet pas d'obtenir les rendements les plus élevés. L'enfouissement des résidus de récolte (fanes de maïs, pailles de céréales et dernière coupe de luzerne) n'a eu aucun effet mesurable sur les rendements du maïs.

— Mais l'implantation d'une luzernière dans la rotation (ou même d'une culture de colza) permet déjà au maïs qui suit de mieux valoriser l'eau d'irrigation, vraisemblablement par suite d'une meilleure nutrition. Cependant, l'interruption fréquente de rotations céréalières par une culture de type luzerne permet avant tout, par son rôle chimique (enraye par exemple l'apparition d'une carence en zinc) et physique (amélioration de la structure du sol en rotation céréalière), d'éviter la diminution progressive de rendement du maïs.

— Le fait de faire revenir le maïs sur lui-même ne se traduit pas par les mêmes effets lorsqu'il y a ou non présence de luzerne dans la rotation. Alors qu'en absence de luzerne, le précédent maïs est encore préférable à tous les autres précédents céréaliers, avec luzerne, on obtient les rendements les plus élevés.

Reçu pour publication en janvier 1975

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont aux Stations de Zoologie et de Pathologie de Colmar pour leur assistance dans la surveillance des essais, au Domaine pour le prêt de certains matériels de culture, et plus spécialement, à M. WAGNER, de la Station de Viticulture, qui, par ses conseils, a facilité l'analyse statistique des résultats, et à M. REBISCHUNG pour ses nombreuses suggestions dans la mise en forme de l'article.

Ces essais ont été effectués par la Section régionale de Colmar du Service d'Expérimentation et d'Information de l'Institut national de la Recherche agronomique (R. SPECTY, J. MEYER, J. L. MEYER, J. AMBIEHL, H. KLEINDIENST) avec le concours du Service du Génie rural, des Eaux et des Forêts du Haut-Rhin et l'aide de l'A. N. D. A.

SUMMARY

STUDY OF THE ACCUMULATIVE EFFECTS AND AFTER EFFECTS OF SEVERAL AGRONOMICAL FACTORS APPLIED WITHIN THE FRAMEWORK OF ROTATIONS POSSIBLE IN THE IRRIGATED HARDT REGION.

I. — INCOMPLETE RESULTS ON MAIZE CROPS

Following up on irrigation trials undertaken by the Department of Rural Engineering with a view to directing the development of the Hardt region, experimental apparatus was set up in Algolsheim in 1966 by the Colmar S. E. I. section. It should enable farmers to know the long-term effects of systematically and repeatedly adopting certain techniques. The various options take

into consideration the local evolution of production systems and structures, as well as the problem of maintaining some soil fertility. The accumulative effects and after effects of various options dealing with rotation, irrigation and the ploughing-in of harvest residue are measured on maize (a crop common to all the rotations) present each year on a series of soils with different « histories ».

Under trial conditions, maize irrigation is imperative and improved when accompanied by measures to ameliorate the plant's nutrition. The planting of a « lucern » type crop within the rotation is especially necessary to the maize crop when there is irrigation ; it may prove indispensible according to the chosen succession of annual crops. As is shown by the study of interactions, the result of « the return of maize » must be treated separately according to whether or not lucern is present in the rotation. Though maize after maize is valid on a relatevely large scale, this practice seems to be less justifiable when high yields are required.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBER KUMULIERTE FOLGEN UND NACHWIRKUNGEN MEHRERER, IM RAHMEN VON MÖGLICHEN FRUCHTFOLGEN IN DER BEWÄSSERTEN HARDT, ANGEWENDETEN AGRONOMISCHEN FAKTOREN. I. — TEILERGEBNISSE VON KÖRNERMAÏS KULTUREN

Als Fortsetzung der Bewässerungsversuche die vom Wasserwirtschaftsamt schon durchgeführt wurden um eine zweckmässige Bewirtschaftung « der Hardt » zu bewirken, stellte die Untersuchungs-und Informationsstelle (S. E. I.) von Colmar in Algolsheim, im Jahre 1966, ein umfangreiches Versuchsprogramm auf. Die Folgeerscheinungen einer systematischen, wiederholten und langfristigen Anwendung bestimmter Verfahren, sollen den Landwirten kund getan werden. Die verschiedenen Möglichkeiten berücksichtigen die lokale Entwicklung der Struktur und des Produktionsystems, sowie die Notwendigkeit eine gewisse Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Jedes Jahr, wird auf dem Maïs — diese Kultur ist in allen Fruchtfolgen einbegriffen — einer Anzahl von Feldschlägen mit unterschiedlicher « Vergangenheit » sowohl die Kumulierten Wirkungen als auch die Nachwirkungen auf den Fruchtwechsel, die Bewässerung und das Einpflügen der Ernterückstände, gemessen.

Die Lage des Versuchsgelände bringt es mit sich, dass Bewässerung unbedingt nötig ist, aber vorteilhafter wirkt wenn Massnahmen zur Verbesserung der Pflanzenernährung getroffen werden. Die Eingliederung einer Kultur vom Typ « Luzerne » in die Fruchtfolge ist für den Maïsanbau um so nötiger wenn zur Bewässerung gegriffen werden muss. Je nach der gewählten Reihenfolge einjähriger Kulturen, kann sie sich sogar als unerlässlich erweisen. Die Untersuchung von Wechselwirkungen zeigt dass der Folgeeffekt Maïs auf Maïs gesondert behandelt werden muss je nachdem Luzerne in der Fruchtfolge vorhanden oder nicht vorhanden war. Est besteht die Möglichkeit unter relativextensiven landwirtschaftlichen Bedingungen Maïs auf Maïs folgen zu lassen, aber diese Handlungsweise scheint weniger gerechtfertigt wenn höhe Ernteerträge erziehlt werden sollen.

РЕЗЮМЕ

Изучение совместных эффектов и последействия некоторых агрономических факторов применяющихся в кадре возможных севооборотов в орошаемых частях Хардта. — 1) Частичные результаты с культурами кукурузы на зерно.

Р. СПЕКТИ

Сразу по окончании опытов орошения предпринятых Отделом Сельского Строительства для руководства планировкой лесного массива Хардт, секция Отдела Экспериментации и Информации И.Н.Р.А. в Коль-

маре провела в 1966-м году в Альгольсхейме мероприятия, чтобы продемонстрировать местным сельским хозяевам эффекты вызывающиеся за определенный срок систематическим и повторным применением некоторых технических приемов культуры. Разные бронированные оптации принимали во внимане местную эволюцию структур и систем продукции, также как и заботу о поддержании продуктивности почвы на определенном уровне. На кукурузе (общей для всех севооборотов культуре), фигурировавшей каждый год в одной из серий оборота, имевшего каждый свою « историю », определялись совместные эффекты и последействие разных оптаций : порядок оборота, орошение, запахивание пожнивных остатков.

В условиях опытных полей, орошение кукурузы является императивом и еще выигрывает при одновременном принятии мер направленных к улучшению питания растений. Введение в севооборот культур типа люцерны является еще более необходимым кукурузе при орошении; и может стать совершенно необходимым в зависимости от выбранной последовательности однолетних культур.

Как показывает изучение взаимодействий, эффект « возвращения кукурузы после кукурузы », необходимо рассматривать раздельно, в зависимости от присутствия или отсутствия люцерны в севообороте. А экстенсивность ведения культуры кукурузы после кукурузы не оправдывается в случае необходимости получения крупных урожаев.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM H., SPECTY R., 1964. Application à la Hardt de données générales de bioclimatologie. *6e Congrès International du Génie Rural*, Lausanne.

DECOVILLE-FALLER M., 1966. *La Hardt, données humaines et économiques : Contribution à l'étude d'une région agricole en voie de développement.* G.R. du Haut-Rhin.

KOËNIG D., 1970. *La culture du maïs dans la Hardt.* Rapport de stage.

SPECTY R., 1966. Un exemple d'avertissements bioclimatologiques : le « Bulletin de l'Irrigant » du Haut-Rhin. *Bull. techn. Inform.*, **210**, 455-462.

SPECTY R., STENGEL B., MEYER J., 1967. Résultats de trois années d'essais de fractionnement des apports d'eau en irrigation et d'implantation de brise-vents dans la Hardt. *Génie Rural*, 7 et 8.

SPECTY R., GRAFF A., 1968. Le périmètre irrigué d'Algolsheim. *Bull. techn. Inform.*, **230**, 509-519.

SPECTY R., 1969. Problèmes soulevés par le fonctionnement d'un service d'avertissement en irrigation dans la plaine d'Alsace. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 245-247.

SPECTY R., SCHENCK C., 1969. *Étude du choix d'un type d'installation individuelle d'irrigation par aspersion.* Étude 1970, *Bull. techn. Inform.*, **248**, 221-236.

SPECTY R., 1972. Résultats partiels des essais d'Algolsheim portant sur le choix d'un système cultural en grande culture. *I.C.I.D. Bull.*

1962. *Enquête sur les structures agricoles du Haut-Rhin.* Comité Directeur d'Action Agricole du C.A.H.R.

1963 à 1971. *Incidence de l'irrigation sur l'évolution agricole de la Hardt.* Étude du Centre de Gestion et d'Économie Rurale de Côte d'Or. G.R. du Haut-Rhin.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 199-213.

VARIATIONS DES TENEURS EN ACIDES AMINÉS, AMIDES ET ACIDES ORGANIQUES DANS LES COMPOSTS DE CULTURE D'*AGARICUS BISPORUS* LGE, EN FONCTION DE LA PRODUCTION DE CARPOPHORES

J. C. LATCHÉ et M. PIQUEMAL

Centre de Physiologie végétale, Université Paul Sabatier,
Équipe associée au C. N. R. S. : Enzymologie et Métabolisme,
118, route de Narbonne,
31077 Toulouse Cedex

RÉSUMÉ

Les teneurs en acides aminés protéiques, acides aminés et amides libres ainsi qu'en acides organiques non volatils, sont suivies, en fonction du temps, dans les composts de culture d'*Agaricus bisporus* LGE. Cette étude est réalisée parallèlement sur des échantillons non gobetés, n'assurant que le développement végétatif des hyphes mycéliennes, et gobetés, c'est-à-dire conduisant en plus à l'obtention des fructifications. En outre, l'examen de quatre cultures successives, de productivité inégale, permet de tirer des conclusions en fonction du rendement en carpophores.

L'analyse de la fraction insoluble montre que la dégradation des macromolécules azotées s'effectue de manière identique dans les milieux gobetés et non gobetés.

En ce qui concerne la fraction soluble, on remarque une utilisation préférentielle de proline dans les composts gobetés : le rôle éventuel de cet amino-acide au cours de la fructification d'*Agaricus bisporus* reste à préciser. La croissance du mycélium d'Agaric s'accompagne d'une forte excrétion d'acide oxalique. Elle est indépendante de la production de carpophores. Ce fait pose le problème du rôle physiologique de l'oxalate chez le champignon de couche, d'autant plus que les variations des teneurs en acide oxalique au cours d'une même culture suggèrent une utilisation probable de ce composé, habituellement considéré comme un déchet du métabolisme carboné.

INTRODUCTION

La culture d'*Agaricus bisporus*, qui était restée pendant longtemps très empirique, a fait l'objet ces dernières années de nombreuses investigations. Ces recherches, dans la plupart des cas, visent essentiellement à obtenir un substrat mieux adapté aux besoins nutritifs du champignon, permettant de ce fait une meilleure productivité. Deux préoccupations nous ont guidés au cours du présent travail :

— contribuer, d'une part, à une meilleure connaissance des modifications qu'entraînent dans le milieu le développement des hyphes mycéliennes et la production de carpophores,

— vérifier, d'autre part, si certains résultats enregistrés au laboratoire à partir de mycélium obtenu sur mélanges semi-synthétiques liquides (PIQUEMAL, 1970 ; PIQUEMAL *et al.*, 1970), étaient confirmés dans des conditions culturales identiques à celles adoptées en champignonnière.

Dans ce but, nous avons suivi en fonction du temps de culture l'évolution de quelques constituants du milieu : acides aminés protéiques, acides aminés et amides libres, acides organiques. Une comparaison a été effectuée entre les composts gobetés et non gobetés. Le gobetage, qui consiste à recouvrir le compost d'un mélange de terre calcaire et de tourbe, est indispensable au déclenchement du processus de fructification et, en son absence, seule se produit la croissance végétative du mycélium.

MATÉRIEL ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1. — *Matériel*

Le compost nous est fourni au terme de la phase d'incubation du « blanc » (variété SOMYCEL nº 11), par des champignonnistes de la région bordelaise. Dès réception, il est réparti dans des caissettes de bois (surface 0,25 m² ; hauteur : 12 cm). Deux lots homologues sont constitués : l'un est laissé tel quel, le second est gobeté. Toutes les caisses sont alors placées dans une salle conditionnée, à une température de 16ºC, l'hygrométrie variant entre 80 et 90 p. 100 de la saturation ;

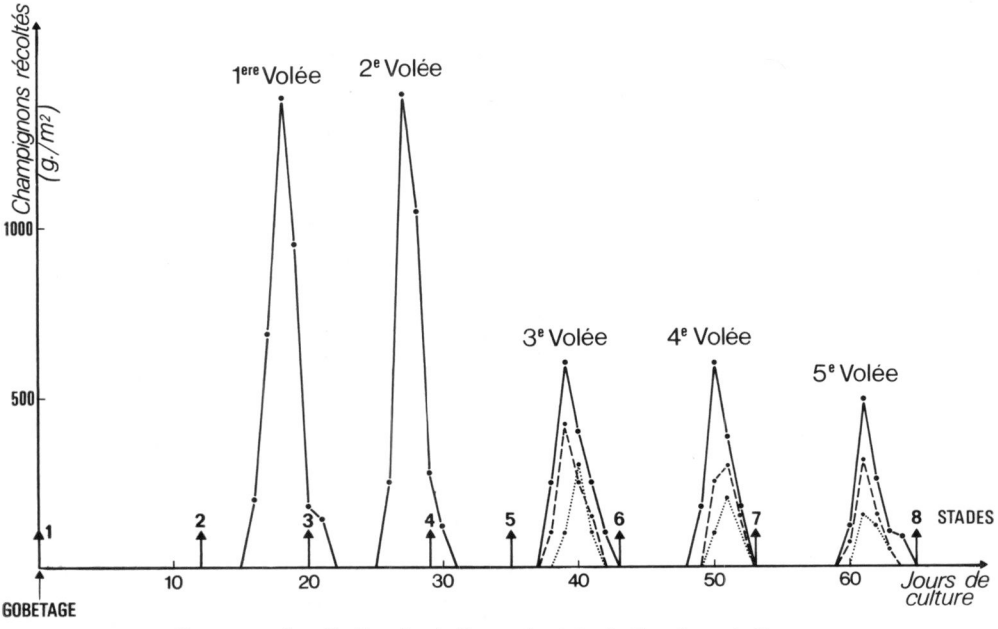


FIG. 1. — *Localisation des prélèvements et production de carpophores sur les caisses gobetées* (g/m²), *en fonction du temps de culture*

——— rendement moyen des cultures A et B
— — — — rendement de la culture C, en 3e, 4e et 5e volées
····· rendement de la culture D, en 3e, 4e et 5e volées

en outre, des arrosages fréquents à l'eau distillée maintiennent le compost à un degré d'humidité convenable.

Quatre cultures, échelonnées entre janvier 1971 et décembre 1973, sont analysées : elles sont désignées par les lettres A, B, C, D. Comme le montre la figure 1, les premières (A et B) ont conduit à un bon rendement ; par contre, la production de carpophores a été faible dans les trois dernières volées des cultures C et, surtout, D. Ce graphique permet également de localiser les différents stades d'analyse, qui sont choisis en fonction de l'apparition des fructifications sur les caisses gobetées. Le stade 1 se situe au moment du gobetage, à la fin de la phase de développement végétatif du mycélium : les hyphes sont ramifiées et forment un réseau plus ou moins dense à l'intérieur du substratum nutritif. Au stade 2, on note la formation des premières ébauches de carpophores. Les échantillons 3, 4, 6, 7 et 8 sont prélevés respectivement après la sortie des première, deuxième, troisième, quatrième et cinquième volées : on remarque alors une destruction progressive des brins de paille du compost, qui paraît toutefois plus importante dans les caisses gobetées par rapport aux caisses non gobetées. Le stade 5 enfin est pris dans l'intervalle, relativement long, séparant la deuxième et la troisième sortie de champignons.

Dans chaque cas, l'échantillon analysé correspond à la somme de 15 prises d'essai (50 à 100 g) effectuées en plusieurs points sur 5 caisses. Malgré la nature hétérogène du compost, Dureau et Delmas (1962) ont montré qu'un tel échantillonnage conduisait à des résultats significatifs. Les plus gros cordons mycéliens et, s'il y a lieu, les fragments de terre de gobetage sont soigneusement éliminés. Toutefois, il convient de souligner que, malgré ces précautions, il est impossible de séparer le substratum inerte de la matière vivante qui s'y développe, mycélium d'*Agaricus* et micro-organismes. Le taux de substance sèche est déterminé sur une partie aliquote après dessiccation à 105°C jusqu'à poids constant (Dureau et Delmas, 1962) : il varie de 30 p. 100 à 40 p. 100 du stade initial au stade final. Le matériel destiné à l'analyse est fixé à l'azote liquide et conservé, éventuellement, dans l'éthanol à 96°GL, à — 20°C.

2. — *Techniques expérimentales*

Plusieurs méthodes d'extraction ont été essayées au cours d'études préliminaires (Latché, 1970). La technique suivante a finalement été retenue. Après broyage de l'échantillon dans l'éthanol à 96°GL (omnimixer Sorvall ; température : 0 à + 5°C), on procède, par agitation magnétique, à 7 extractions successives de 30 minutes chacune : les cinq premières sont réalisées à basse température (0 à + 5°C), deux par l'éthanol à 80°GL, deux par l'éthanol à 60°GL, une par l'eau distillée ; on répète ensuite l'opération 2 fois, à 100°C, dans l'éthanol à 80°GL puis 60°GL. Enfin, un dernier traitement (2 heures ; température ambiante) par de l'eau additionnée de résine Dowex 50, forme H^+, permet de solubiliser les acides organiques éventuellement présents sous forme de sels peu solubles en milieu aqueux ou hydroéthanolique (Roux et Lesaint, 1959). Les différents liquides d'extraction, récupérés dans chaque cas par centrifugation, sont réunis ; le culot insoluble, débarrassé de la résine par lavages successifs, est séché sous vide en présence de chlorure de calcium, pendant 96 heures.

Le fractionnement de l'extrait total, préalablement concentré par évaporation sous pression réduite, est effectué par passages sur échangeurs d'ions, selon des méthodes désormais classiques. Les composés cationiques, retenus sur colonne de Dowex 50, forme H^+, sont élués par l'ammoniaque N, puis 2N. La fraction anionique, fixée sur résine Dowex 2, forme carbonate, est éluée par le carbonate d'ammonium 0,5 M, puis la soude N (Bové *et al.*, 1957).

Les acides aminés et amides libres sont dosés à l' « Amino acid analyzer Beckman » ; il en est de même des acides aminés protéiques, libérés par hydrolyse du résidu d'extraction insoluble (HCl 6N, 110°C, 48 heures). Les acides organiques sont analysés par chromatographie sur colonne de célite (Carles, 1968) : une légère modification de la méthode permet toutefois de mieux séparer les acides succinique et pyrrolidone-carboxylique.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. — *Acides aminés protéiques*

La fraction insoluble du compost est beaucoup plus riche en acides aminés que la fraction soluble : elle renferme de 88 p. 100 à 94 p. 100 du total des aminoacides dosés. Ce fait a déjà été signalé par Delmas et Dureau (1962), Delmas et Poitou

(1965), DELMAS *et al.* (1968). L'acide glutamique, le glycocolle, l'α-alanine, l'acide aspartique et la proline sont les composés les plus fortement représentés. Viennent ensuite, par ordre décroissant, la leucine, la valine, la sérine, la thréonine, l'isoleucine, la lysine et la phénylalanine. Les teneurs en arginine, histidine, tyrosine et acides aminés soufrés sont plus faibles. Ces résultats confirment ceux enregistrés au cours d'un travail précédent (LATCHÉ, 1970).

Deux points sont à souligner :

— On note, en fonction du temps de culture, une diminution progressive des teneurs en acides aminés protéiques, traduisant leur utilisation. Elle est toutefois plus rapide du stade 1 au stade 6 que dans les derniers échantillons. De plus, elle est légèrement plus importante, quantitativement, dans les caisses gobetées, surtout pour les cultures A et B qui conduisent à une forte production de carpophores.

— Les proportions relatives des différents constituants de la fraction insoluble restent sensiblement constantes à tous les stades. Ce résultat est valable aussi bien dans le compost non gobeté que dans le compost gobeté : il paraît indiquer que les macromolécules azotées sont dans les deux cas dégradées de façon identique tout au long de la culture. Ceci conduit à rechercher, dans la composition de la fraction soluble, des différences que l'on pourrait relier à l'apparition des carpophores ou, au contraire, à leur absence.

II. — *Acides aminés solubles*

Les résultats se rapportant à la culture A sont donnés en détail, à titre d'exemple.

La figure 2 illustre l'évolution des teneurs globales en amino-acides libres. On constate que les chiffres obtenus à partir des composts non gobetés sont supérieurs,

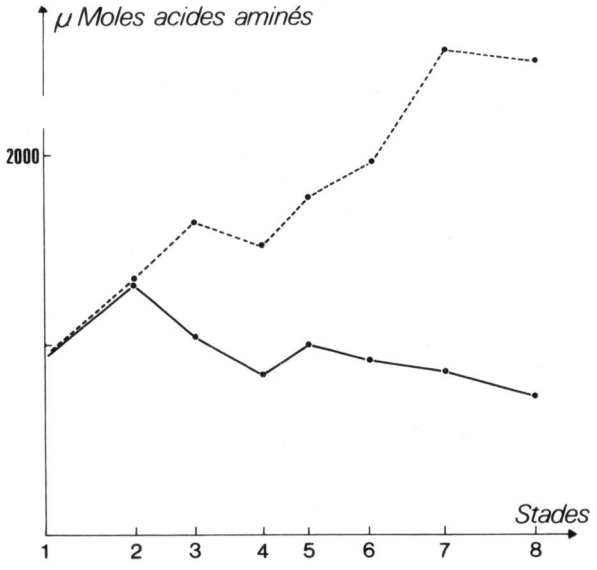


FIG. 2. — *Culture A : teneurs en acides aminés libres, en µMoles/100 g de compost sec, aux différents stades d'étude tels qu'ils sont définis dans la figure 1*

——— compost gobeté
------- compost non gobeté

essentiellement en fin de culture où ils sont environ 3 fois plus élevés : la production des fructifications, entraînant une disparition partielle des éléments nutritifs du milieu dans les caisses gobetées, peut expliquer cette constatation.

Les tableaux 1, 2 et 3 rendent compte de la composition de la fraction azotée soluble dans les divers échantillons. Seuls les principaux constituants, — rangés selon leur appartenance aux différentes familles métaboliques d'acides aminés — sont mentionnés. Les teneurs en histidine, cystine, cystathionine, méthionine sulfone, acide α-aminoadipique et citrulline, toujours très faibles, n'ont souvent pu être évaluées avec une précision suffisante et sont donc omises.

TABLEAU I

Culture A : principaux composés azotés solubles aux stades 1 et 2

(teneurs en µMoles/100 g de compost sec
et composition centésimale de la fraction acides aminés)

	Stade 1		Stade 2			
			Compost non gobeté		Compost gobeté	
	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p . 100
Total acides aminés dosés	950		1 340		1 320	
Principaux acides aminés dosés :						
Ac. glutamique	302	31,8	339	25,3	331	25,0
Proline	146	15,3	220	16,4	185	14,0
Ac. γ-aminobutyrique	21	2,2	41	3,1	35	2,7
Ornithine	20	2,1	21	1,6	24	1,8
Arginine	28	3,0	19	1,4	21	1,6
Lysine	41	4,3	40	3,0	46	3,5
Ac. aspartique	67	7,1	99	7,4	98	7,4
Thréonine	20	2,1	43	3,2	41	3,1
Isoleucine	13	1,3	31	2,3	31	2,3
Méthionine	25	2,6	48	3,6	52	3,9
Alanine	83	9,7	159	11,9	159	12,1
Valine	21	2,2	47	3,5	48	3,6
Leucine	45	4,7	80	6,0	78	5,9
Glycocolle	26	2,6	41	3,1	40	3,0
Sérine	43	4,3	67	5,0	68	5,2
Tyrosine	4	0,4	6	0,5	8	0,6
Phénylalanine	13	1,4	31	2,3	32	2,4
Glutamine + Asparagine	113		127		123	

Avant la première sortie de carpophores (prélèvements 1 et 2), aucune différence significative n'apparaît entre les milieux productif et improductif (tabl. 1). L'acide glutamique, la proline, l'acide aspartique et l'α-alanine représentent entre 58 et

TABLEAU 2

Culture A, compost non gobeté : principaux composés azotés solubles, stades 3 à 8

(teneurs en µMoles/100 g de compost sec
et composition centésimale de la fraction acides aminés)

	Stade 3		Stade 4		Stade 5		Stade 6		Stade 7		Stade 8	
	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100
Total des acides aminés dosés	1 656		1 537		1 772		1 968		2 579		2 502	
Principaux acides aminés dosés :												
Ac. glutamique	390	23,5	436	28,4	445	25,1	480	24,4	526	20,4	520	20,8
Proline	435	26,3	421	27,4	473	26,7	529	26,9	868	33,7	850	34,0
Ac. γ-aminobutyrique	58	3,5	58	3,8	64	3,6	75	3,8	56	2,2	61	2,4
Ornithine	23	1,4	26	1,7	26	1,5	28	1,4	55	2,1	46	1,8
Arginine	14	0,8	18	1,2	16	0,9	14	0,7	35	1,4	36	1,5
Lysine	32	1,9	41	2,7	45	2,5	48	2,4	77	3,0	65	2,6
Ac. aspartique	105	6,3	91	5,9	112	6,3	120	6,1	149	5,8	143	5,7
Thréonine	45	2,7	22	1,5	39	2,2	49	2,5	66	2,6	65	2,6
Isoleucine	33	2,0	20	1,3	29	1,6	36	1,8	43	1,7	40	1,6
Méthionine	44	2,7	48	3,1	52	2,9	60	3,0	46	1,8	58	2,3
Alanine	160	9,7	148	9,7	160	9,1	188	9,6	239	9,3	220	8,8
Valine	50	3,0	48	3,1	56	3,2	58	2,9	62	2,4	60	2,4
Leucine	79	4,7	47	3,1	73	4,1	82	4,2	96	3,7	86	3,4
Glycocolle	44	2,6	21	1,3	46	2,6	45	2,3	65	2,5	63	2,5
Sérine	72	4,3	54	3,5	89	5,0	88	4,5	109	4,2	99	4,0
Tyrosine	4	0,2	5	0,3	6	0,3	6	0,3	7	0,3	7	0,3
Phénylalanine	33	2,0	20	1,3	32	1,8	36	1,8	47	1,8	40	1,6
Glutamine + Asparagine	137		129		128		112		254		238	

TABLEAU 3

Culture A, compost gobeté : principaux composés azotés solubles, stades 3 à 8

(teneurs en µMoles/100 g de compost sec
et composition centésimale de la fraction acides aminés)

	Stade 3		Stade 4		Stade 5		Stade 6		Stade 7		Stade 8	
	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100	µMoles	p. 100
Total des acides aminés dosés	1 036		841		1 012		918		867		734	
Principaux acides aminés dosés :												
Ac. glutamique	239	23,1	173	20,6	208	20,6	204	22,2	264	30,5	200	27,3
Proline	43	4,1	94	11,2	161	15,9	143	15,6	156	18,1	151	20,6
Ac. γ-aminobutyrique	28	2,7	17	2,0	19	1,9	14	1,5	12	1,3	11	1,5
Ornithine	31	3,0	11	1,3	16	1,6	13	1,5	9	1,0	7	1,0
Arginine	13	1,2	6	0,7	10	1,0	8	0,8	11	1,2	5	0,7
Lysine	44	4,3	26	3,1	35	3,5	29	3,1	18	2,1	16	2,2
Ac. aspartique	82	7,9	65	7,7	66	6,5	56	6,1	48	5,5	51	7,0
Thréonine	39	3,8	42	5,0	45	4,5	42	4,6	31	3,6	20	2,8
Isoleucine	28	2,7	18	2,2	31	3,1	26	2,9	18	2,1	10	1,4
Méthionine	51	5,0	48	5,7	30	3,0	32	3,5	32	3,7	56	7,6
Alanine	154	14,9	100	11,9	116	11,5	113	12,3	75	8,6	61	8,3
Valine	47	4,5	32	3,8	41	4,1	37	4,0	25	2,9	18	2,5
Leucine	79	7,7	56	6,7	64	6,3	62	6,7	43	5,0	30	4,0
Glycocolle	38	3,6	36	4,3	40	4,0	31	3,4	29	3,3	22	3,1
Sérine	59	5,7	58	6,8	64	6,4	53	5,7	42	4,8	38	5,2
Tyrosine	14	1,4	14	1,7	17	1,6	11	1,2	9	1,0	6	0,8
Phénylalanine	34	3,3	29	3,4	32	3,2	30	3,3	43	5,0	29	4,0
Glutamine + Asparagine	53		48		57		42		95		66	

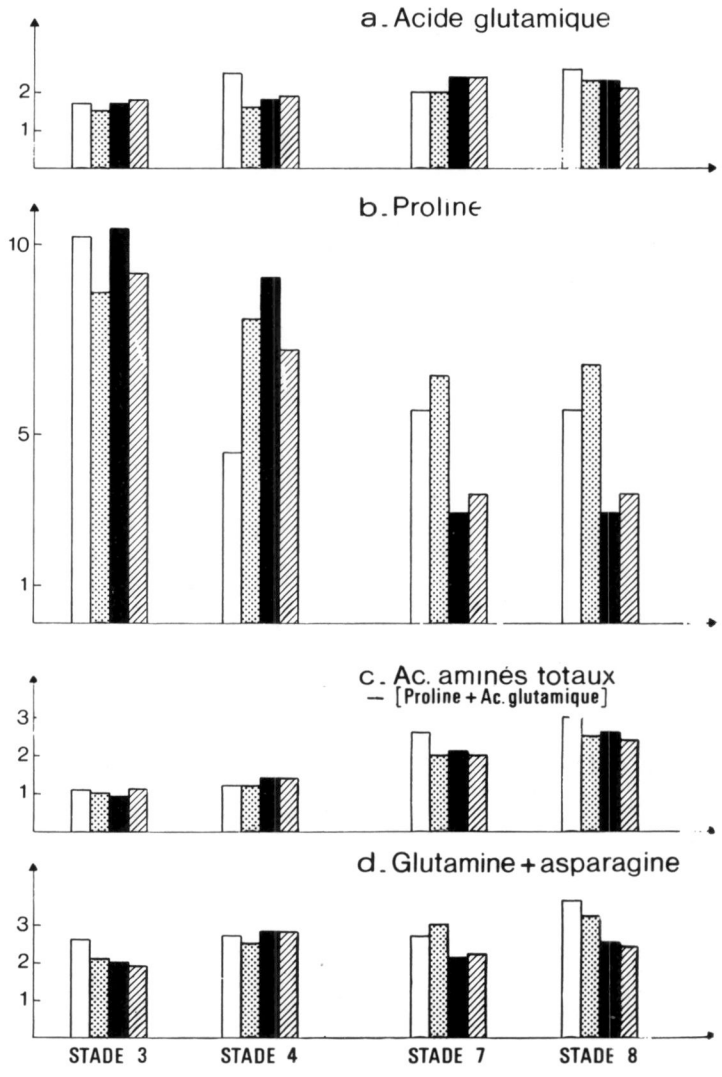


FIG. 3. — *Rapports* $\frac{\text{teneurs dans les composts non gobetés}}{\text{teneurs dans les composts gobetés}}$, *en* :

a : acide glutamique
b : proline
c : acides aminés totaux — [proline + acide glutamique]
d : glutamine + asparagine

Culture A
Culture B
Culture C
Culture D

Définition des stades d'étude : voir figure 1

63 p. 100 de l'ensemble des composés dosés, avec toutefois une nette prédominance du glutamate (25 à 31,8 p. 100). L'examen du tableau 2 montre que la proline devient le composé prépondérant dans le compost non gobeté. Ce fait constitue une différence fondamentale relativement au compost gobeté (tabl. 3) : on note en effet dans ce dernier, tout au long de la culture, de fortes concentrations en glutamate, alors que les teneurs en proline diminuent, cette baisse étant plus accusée aux stades 3 et 4. La comparaison entre les compositions centésimales des extraits correspondants aux deux types de milieux fait également apparaître, dans les échantillons gobetés, des taux inférieurs en acide γ-aminobutyrique et, au contraire, légèrement supérieurs en thréonine, méthionine, leucine, sérine, α-alanine et acides aminés aromatiques.

L'accumulation de proline dans le compost non gobeté a plus particulièrement retenu notre attention. Elle pouvait constituer une particularité physiologique de la croissance végétative du mycélium d'*Agaricus bisporus* : cette éventualité semble peu probable car aucune excrétion de proline n'a été observée dans des cultures effectuées *in vitro* sur des milieux nutritifs de différentes compositions (Piquemal, 1970 ; Latché et Piquemal, résultats à paraître). Une deuxième hypothèse paraît plus plausible : la proline résulte de l'hydrolyse des protéines du compost et elle est utilisée préférentiellement, dans les caisses gobetées, lors de la production des carpophores. Quelques arguments viennent corroborer cette supposition :

— La diminution des teneurs en proline dans les échantillons de milieu productif s'effectue brutalement à la sortie de la première volée (stade 3, tabl. 3) ; de plus, elle est importante au moment où le rendement en fructifications est le plus fort (stades 3 et 4) et les différences s'atténuent par la suite.

— La comparaison entre les diverses cultures analysées (fig. 3) montre que cette variation des concentrations en proline est observée dans tous les cas ; c'est le fait le plus marquant au sein de la fraction azotée soluble. Toutefois les variations sont de plus faible amplitude aux stades 7 et 8 des cultures C et D, c'est-à-dire lorsque la production en carpophores est également peu importante, comparativement aux cultures A et B.

— Divers auteurs, dont Treschow (1944), Casimir et Heinemann (1958), Bohus (1959), ont étudié les besoins nutritifs du mycélium d'*Agaricus bisporus*. La proline n'est jamais citée comme une bonne source d'azote : il est donc logique qu'elle ne soit que peu utilisée dans les composts non gobetés pour le développement végétatif du blanc, d'où son accumulation.

III. — *Amides libres*

Les chiffres figurant dans les tableaux 1, 2 et 3 représentent la somme des concentrations en glutamine et asparagine : ces deux amides ne sont pas séparées à l' « Amino acid analyzer Beckman » dans les conditions expérimentales retenues. Les valeurs sont exprimées en équivalents glutamine, des chromatographies sur papier ayant montré que ce composé était nettement prépondérant.

L'examen des données obtenues (tabl. 1, 2, 3 et fig. 3) fait ressortir l'existence de teneurs plus importantes en amides dans les caisses non gobetées, essentiellement en fin de culture. Ce résultat est donc analogue à celui enregistré pour les aminoacides libres.

IV. — *Acides organiques*

La composition de la fraction anionique (culture A) figure dans le tableau 4. Il faut en plus signaler la présence, à l'état de traces non dosables, d'acide citrique dans tous les échantillons ainsi que des acides glycolique et lactique en fin de culture. L'acide oxalique est le composé le plus fortement représenté, ce qui confirme des résultats antérieurs, acquis en particulier par TSU-NING TSAO (1963) et EGER et SÜCKER (1964) ; l'oxalate est également excrété en grandes quantités par le mycélium d'Agaric cultivé sur milieu semi-synthétique (IVANOVICH, 1965 ; PIQUEMAL, 1970). Parmi les intermédiaires du cycle de KREBS, c'est l'acide malique qui est le plus abondant, les chiffres relatifs au fumarate et au succinate restant faibles. L'acide pyrrolidone-carboxylique est souvent considéré comme un artéfact provenant de la décomposition du glutamate et de la glutamine sur résine Dowex 50 (ELIFOLK et SYNGE, 1955). Sans nier cette éventualité, on note que les variations, dans les différents échantillons, des taux de glutamate, glutamine et pyrrolidone-carboxylate ne sont pas parallèles ; de plus, une étude par chromatographie sur papier révèle l'existence d'acide pyrrolidone-carboxylique dans les extraits bruts, avant passage sur échangeurs d'ions.

TABLEAU 4

Culture A : teneurs en acides organiques, en µMoles/g de compost sec

	Stade 1	Stade 2	Stade 3	Stade 4	Stade 5	Stade 6	Stade 7	Stade 8
Compost non gobeté								
Acide oxalique	17,4	30,0	32,7	38,4	30,1	33,0	63,1	80,6
Acide succinique	1,2	2,0	2,7	2,1	2,0	1,2	2,4	3,0
Acide fumarique	0,4	0,6	0,5	1,0	1,0	0,9	1,1	2,1
Acide malique	8,3	7,9	7,6	11,2	4,8	4,0	8,9	17,0
Acide pyrrolidone-carboxylique	5,0	3,9	2,0	10,3	2,9	3,7	13,1	14,3
Compost gobeté								
Acide oxalique	17,4	31,3	40,0	39,0	21,2	18,7	57,3	76,6
Acide succinique	1,2	1,9	2,1	1,2	1,4	1,5	2,3	3,1
Acide fumarique	0,4	1,0	1,2	0,7	0,7	0,5	1,2	1,5
Acide malique	8,3	8,6	8,5	12,9	7,8	6,0	11,1	11,4
Acide pyrrolidone-carboxylique	5,0	4,1	1,6	11,0	3,4	0,9	8,6	10,6

Les teneurs en acides succinique et fumarique demeurent à peu près constantes mais celles en acides oxalique et malique varient en fonction du temps de culture : on remarque notamment, en ce qui concerne l'oxalate, une forte diminution aux stades 5 et 6, suivie d'une augmentation ultérieure. Cette évolution de l'acide oxalique est semblable dans les composts non gobeté et gobeté. Elle reste donc indépendante de la production de carpophores ; ce fait est en accord avec les données acquises par EGER et SÜCKER (1964), qui ne constatent aucune relation entre le métabolisme

de l'acide oxalique et la formation des fructifications chez *Agaricus bisporus*. Si l'on admet que l'apparition d'oxalate dans le compost traduit une forte croissance mycélienne, il faut supposer qu'il y aurait au cours d'une même culture deux « poussées » de mycélium : la première (stades 1, 2 et 3) serait responsable de la production des deux volées initiales, la seconde (stades 7 et 8) serait nécessaire à la sortie des autres fructifications. Les données résumées dans le tableau 5 apportent des arguments en faveur de cette hypothèse. Il a été précisé antérieurement que les cultures B, C et D conduisaient, en troisième, quatrième et cinquième volées à des rendements inégaux pour les caisses gobetées : la production de sporophores est bonne pour le lot B, moyenne pour C, faible pour D. Parallèlement, les taux d'oxalate dans les composts aux stades correspondants (prélèvements 7 et 8) sont plus élevés dans la culture B que dans les cultures C et surtout D, où la formation d'acide oxalique est pratiquement nulle.

TABLEAU 5

Teneurs en acide oxalique, en µMoles/g de compost sec, dans les cultures B (bons rendements), *C et D* (faibles rendements en 3e, 4e et 5e volées)

	Stade 3	Stade 4	Stade 6	Stade 7	Stade 8
Compost non gobeté					
Culture B	53,7	58,7	19,9	34,4	58,7
Culture C	48,3	46,2	35,2	56,4	43,2
Culture D	58,0	56,0	4,8	5,2	1,3
Compost gobeté					
Culture B	53,3	58,2	35,8	72,9	85,5
Culture C	50,2	49,1	28,8	55,6	41,3
Culture D	60,4	58,1	5,1	4,8	1,6

CONCLUSIONS

Parmi les données analytiques apportées par cette étude sur la composition des composts de culture d'*Agaricus bisporus*, trois résultats méritent d'être soulignés :

- la dégradation des protéines s'effectue qualitativement de façon semblable dans les milieux productifs et improductifs ;
- l'évolution des teneurs en oxalate est également indépendante de l'apparition des fructifications ;
- la proline disparaît par contre de façon préférentielle dans les composts gobetés.

Les modifications enregistrées dans le compost au cours d'une culture pourraient avoir une triple cause : la croissance végétative du mycélium d'Agaric, la formation des carpophores, le développement des micro-organismes présents dans le milieu. L'examen parallèle de milieux gobetés et non gobetés permet de dissocier

les deux premiers facteurs. Par ailleurs, une analyse de compost non ensemencé en « blanc » de champignons de couche a été réalisée à titre d'essai témoin. Elle n'a pas conduit à la mise en évidence d'une accumulation d'oxalate et la production d'amides et acides aminés libres, proline en particulier, est faible : ceci semble donc minimiser dans ces phénomènes, l'intervention de micro-organismes et permet au contraire d'en attribuer l'origine au développement d'*Agaricus bisporus*.

Selon plusieurs auteurs, dont FLEGG (1961), SCHISLER (1967), DELMAS et LABORDE (1968), les protéines et les acides aminés constituent les sources d'azote les plus couramment utilisées par le champignon de couche, peu apte à croître à partir de molécules azotées minérales (TRESCHOW, 1944 ; BOHUS, 1959). Les résultats que nous avons obtenus concordent parfaitement avec ces constatations. L'utilisation préférentielle de proline liée à la production de carpophores n'avait, à notre connaissance, jamais été signalée : le rôle joué par cet aminoacide reste toutefois à déterminer.

L'analyse des acides organiques du mycélium d'*Agaricus bisporus* cultivé sur milieu semi-synthétique liquide (PIQUEMAL, 1970 ; PIQUEMAL *et al.*, 1970), a mis en évidence une biosynthèse importante d'acide oxalique. Elle pouvait être due à une mauvaise utilisation des glucides, provoquée par des conditions de culture *in vitro* éventuellement défavorables. La caractérisation d'une biogenèse d'oxalate dans les composts permet d'infirmer cette supposition. La disparition partielle de l'acide oxalique, constatée en cours de culture (stades 5 et 6) pose, de plus, le problème de son utilisation. Il a été partiellement résolu par emploi d'oxalate 1-2^{14}C : ce métabolite donne naissance, chez *Agaricus bisporus*, à du glycocolle, de la sérine, de l'acide glycolique et du $^{14}CO_2$ (PIQUEMAL, 1972). Ces résultats laissent supposer que l'acide oxalique ne constitue pas uniquement un déchet du métabolisme carboné. Les modalités de sa biosynthèse sont en cours d'étude, afin de préciser le rôle physiologique exact de ce composé chez le champignon de couche.

Reçu pour publication en janvier 1975.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre gratitude à M. J. DELMAS, Directeur de la Station de Recherches sur les Champignons du Pont-de-la-Maye (I. N. R. A.), et à MM. J. BAILLY et P. MANUEL, Champignonnistes, grâce à qui nous avons pu effectuer ce travail.

SUMMARY

VARIATIONS IN THE AMINO ACID, AMIDE AND ORGANIC ACID CONTENT OF *AGARICUS BISPORUS* LGE CROP COMPOSTS WITH RESPECT TO CARPOPHORE PRODUCTION

The proteinic amino acid, amino acid and free amide content and also the non-volatile organic acid content are observed, with respect to time, in *Agaricus bisporus* Lge crop composts. This research is carried out concurrently on non-cased samples, ensuring only the vegetative development of the mycelian hyphae, and on cased samples *i.e.* leading, in addition, to pinheading.

Furthermore, the examination of four successive crops of unequal productivity permits conclusions to be drawn with respect to carpophore yield.

Analysis of the insoluble fraction shows that the degradation of the nitrogenous macromolecules is accomplished in an identical manner in cased and non-cased environments.

With regard to the soluble fraction, the preferential utilization of proline is observed in the cased composts : the possible role of this amino acid during pinheading in *Agaricus bisporus* remains to be specified. The growth of the Agaric mycelium is accompanied by a high oxalic acid excretion. It is independent of carpophore production. This fact raises the problem of the physiological role of oxalate in the cultivated mushroom, more especially as the variations in the oxalic acid content in a single crop suggest the probable utilization of this compound, customarily considered as a waste from carbon metabolism.

ZUSAMMENFASSUNG

VARIATION DES GEHALTS AN AMINOSÄUREN, AMIDEN UND ORGANISCHEN SÄURENIM KULTURKOMPOST VON *AGARICUS BISPORUS* LGE ALS FUNKTION DER PRODUKTION VON FRUCHTKÖRPERN

Der Gehalt an Proteinsäuren, Aminosäuren und freien Amiden, sowie an nichtflüchtigen organischen Säuren wurde — als Funktion der Zeit — im Kulturkompost von *Agaricus bisporus* Lge verfolgt. Es wurden Parallelversuche durchgeführt, einerseits auf ungedeckten Proben, nur die vegetative Entwicklung des Mycels sichernd, anderseits auf gedeckten, was mehr zur Erlangung der Fruchtkörperbildung führt. Die Prüfung von vier aufeinanderfolgenden Kulturen, von ungleicher Produktivität, erlaubt ausserdem Schlüsse über den Ertrag von Fruchtkörpern zu ziehen.

Die Analyse der unlöslichen Fraktion zeight, dass sich der Abbau der N-Makromoleküle im gedeckten und nicht-gedeckten Milieu auf gleiche Weise vollzieht.

Was die lösliche Fraktion betrifft, so bemerkt man eine bevorzugte Nutzung von Prolin im gedeckten Kompost : die mögliche Rolle dieser Aminosäure für die Fruktifikation von *Agaricus bisporus* bleibt noch zu bestimmen. Das Wachstum des Mycels geht einher mit einer starken Ausscheidung von Oxalsäure. Diese ist von der Produktion der Fruchtkörper unabhängig. Diese Tatsache stellt das Problem der physiologischen Rolle des Oxalats beim Champignon auf dem Mistbeet, um so mehr als die verschiedenen Gehalte an Oxalsäure im Laufe derselben Kultur eine Verwertung dieser Verbindung nahelegen, die gewöhnlich als Abfallprodukt des C-Stoffwechsels angesehen wird.

РЕЗЮМЕ

Изменения содержания аминокислот, амидов и органических кислот в компостах культуры *Agaricus bisporus Lge* в зависимости от продукции карпофор

Ж. К. ЛАТШЕ, М. ПИКЕМАЛЬ.

Содержание белковых аминокислот, аминокислот, свободных амидов и нелетучих органических кислот изучалось во времени в компостах культуры *Agaricus bisporus Lge*. Изучение проводилось параллельно на образцах неизвесткованного компоста, на которых происходило только вегетативное развитие гифов мицелия, и на образцах известкованных, фаворизировавших плодоношение. Изучение-же четырех последовательных культур неодинаковой продуктивности, позволяло, кроме того, вывести заключение о количестве полученных карпофор.

Анализ нерастворимой фракции показывает что деградация азотистых макромолекул протекает одинаково в средах известкованных и неизвесткованных.

Что-же касается растворимой фракции, то отмечается предпочтительное использование пролина в компостах известкованных; но возможная роль этой аминокислоты во время плодоношения Агарика, нуждается еще в уточнении. Рост мицелия шампиньона сопровождается, кроме того, обильным выделением щавелевой кислоты. Выделение это не зависит от продукции карпофор. Этот факт ставит вопрос о физиологической роли оксалата у шампиньона, особенно, так как изменения содержания щавелевой кислоты в течении культуры заставляют предположить возможное использование этого соединения, рассматривавшегося до сих пор как ненужный отброс углеродного метаболизма.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bohus G., 1959. Investigations concerning the life processes of the cultivated mushroom. *Mushroom Science*, **4**, 86-131.

Bové J., Bové C., Raveux R., 1957. Extraction, séparation et détermination de certains composés hydrosolubles dans les plantules et diverses cultures de tissus de *Citrus limonum*. *Rev. gén. Bot.*, **64**, 572-592.

Carles J., 1968. Le dosage automatique des acides organiques par potentiométrie. *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **50**, 1341-1345.

Casimir J., Heinemann P., 1953. Contribution à l'étude du métabolisme azoté chez les champignons : nutrition du mycélium d'*Agaricus hortensis*, var. *alba*, au moyen de différents acides aminés. *Mushroom Science*, **2**, 21-26.

Delmas J., Dureau P., 1962. Quelques données concernant l'azote dans les composts à champignons de couche. *Mushroom Science*, **5**, 1-9.

Delmas J., Laborde J., 1968. Influence de la forme d'azote utilisée au cours de la fermentation des composts sur l'effet d'une supplémentation protéique apportée au moment du gobetage, et sur le rendement. *Mushroom Science*, **7**, 309-328.

Delmas J., Poitou N., 1965. Les substances azotées et plus particulièrement les acides aminés dans les champignons et les composts. *Mushroom Science*, **6**, 193-202.

Delmas J., Poitou N., Delpech P., 1968. Variations du taux des acides aminés dans un compost destiné à la culture d'*Agaricus bisporus* (lge) sing., au cours de sa préparation et pendant la croissance du mycélium. *C. R. Acad. Sci.*, D, **267**, 1503-1506.

Dureau P., Delmas J., 1962. Essais de méthode d'analyse pour les composts à champignon de couche. *Mushroom Science*, **5**, 39-45.

Eger G., Sücker I., 1964. Besteht ein Zusammenhang zwischen Oxalatausscheidung und Fruchtkörperbildung beim Kulturchampignon *Agaricus bisporus* (lge) sing.? *Arch. Mikrobiol.*, **49**, 275-282.

Ellfolk N., Synge R. L. M., 1955. Detection of pyrrolidone-carboxylic acid. *Biochem. J.* **59**, 523-526.

Flegg P. B., 1961. Mushroom composts and composting : a review of the litterature. *Rep. Glasshouse Crops Res. Inst. 1960* (1961), 125-134.

Ivanovich B., 1965. Cytologial behaviour in mushroom mycelium grown in submerged liquid culture. *Mushroom Science*, **6**, 91-101.

Latché J. C., 1970. *Quelques aspects du métabolisme azoté du carpophore d'*Agaricus bisporus lge. *Étude en fonction du phénomène des volées.* Thèse Doct. (État) Sci. Nat., Toulouse.

Piquemal M., 1970. *Sur le métabolisme de l'acide glutamique, source d'azote et de carbone pour le mycélium d'*Agaricus bisporus lge. Thèse Doct. Spécialité, Toulouse.

Piquemal M., 1972. Utilisation d'oxalate 1-2^{14}C par le mycélium et les fructifications d'*Agaricus bisporus* lge. *C. R. Acad. Sci., D*, **274**, 2667-2670.

Piquemal M., Baldy P., de Serres M., Latché J. C., 1970. Étude, en fonction du temps de croissance, de quelques constituants du mycélium d'*Agaricus bisporus* lge, cultivé sur milieu semi-synthétique. *C. R. Acad. Sci.*, D, **271**, 2316-2319.

Roux L., Lesaint C., 1959. Mise au point d'une technique de détermination des acides organiques chez les végétaux. *Ann. Physiol. Vég.*, **1**, 83-91.

SCHISLER L. C., 1967. Stimulation of yield in the cultivated mushroom by vegetable oils. *Appl. Microbiol.*, **15**, 844-850.

TRESCHOW C., 1944. Nutrition of the cultivated mushroom. *Dansk. bot. Ark.*, **11**, 1-180.

TSU-NING TSAO G., 1963. Production of oxalic acid by a strain of *Agaricus campestris*. *Appl. Microbiol.*, **11**, 255.

Ann. agron., 1975, **26** (2), 215-227.

INFLUENCE DE L'INCORPORATION DE CERTAINES FORMES DE MATIÈRES ORGANIQUES SUR LE POUVOIR CHLOROSANT D'UN SOL CALCAIRE

C. COURPRON † et C. JUSTE

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,
33140 Pont de la Maye

RÉSUMÉ

Dans un essai en vases de végétation et en utilisant comme plante-test du Lupin blanc (*Lupinus albus*), on a mesuré l'influence de l'addition de sulfate de fer et de différentes sources de matières organiques (tiges de maïs et paille de blé), incorporées directement ou préalablement fermentées (à l'étuve ou dans le sol) sur la modification du pouvoir chlorosant d'un sol calcaire. On constate qu'en l'absence de sulfate de fer la fermentation préalable dans le sol des résidus végétaux diminue considérablement l'état chlorotique des plantes et accroît la production de matière sèche. L'effet anti-chlorosant du sulfate de fer est fortement augmenté quand il est incorporé au sol en même temps que les résidus végétaux.

I. — INTRODUCTION

De nombreuses observations font état d'une recrudescence de la chlorose ferrique lorsqu'on incorpore au sol des matières organiques. En effet, COSTE-FLORET affirme dès 1895 que « l'on doit considérer comme une cause aggravante de la chlorose l'importance de la matière organique » ; il explique cet effet par l'augmentation de la teneur en gaz carbonique du milieu, consécutive à l'enfouissement des matières organiques. WALLACE (1960) fait intervenir un mécanisme analogue pour expliquer cet effet négatif de la matière organique, le gaz carbonique engendré par la décomposition des substances fermentescibles entraînant la solubilisation du calcaire et augmentant la concentration en ions bicarboniques, auxquels il attribue un rôle déterminant dans l'apparition de la chlorose. KLIMAN (1937), MILLER et OHLROGGE (1958) font état de la formation de complexes organo-métalliques naturels limitant la disponibilité du fer pour la plante.

Nous avons d'ailleurs, au cours d'expériences antérieures (JUSTE et POUGET, 1967), mis en évidence la possibilité pour la plante de synthétiser elle-même certaines de ces substances complexantes, notamment au niveau des racines, les exsorbats radiculaires de Vigne étant par exemple susceptibles de maintenir le fer en solution, même à des pH nettement alcalins où il devrait précipiter sous forme d'hydroxydes.

Dans un travail plus récent (COURPRON, 1971), il a été montré que les extraits aqueux de pailles de blé ou de tiges de maïs préalablement réduites en poudre possédaient un pouvoir complexant relativement élevé vis-à-vis du fer, la constante de stabilité apparente des complexes formés entre ces extraits et le métal étant nettement supérieure à celle mesurée pour d'autres résidus végétaux, comme par exemple des écorces de résineux ou de feuillus ou des marcs de raisin. Il nous a donc paru intéressant de suivre l'évolution du pouvoir chlorosant d'un sol très calcaire quand on lui incorpore en quantité notable des résidus de végétaux constitués de tiges de maïs ou de pailles de blé, utilisés tels quels ou après fermentation en étuve, et cela en présence ou en l'absence d'une source de fer constituée par du sulfate ferreux.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'essai a été réalisé en serre, dans de petits vases de végétation en polyéthylène contenant 1 kg d'un sol argilo-calcaire très chlorosant des Charentes, dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 1

TABLEAU I

Caractéristiques du sol argilo-calcaire des Charentes

pH-eau	8,0
$CaCO_3$ total (%)	40,6
$CaCO_3$ actif (%)	16,5
Matière organique (%)	3,5
Calcium échangeable (‰)	8,750
Potassium échangeable (‰)	0,390
Magnésium échangeable (‰)	0,165
Acide phosphorique assimilable (‰)	0,290

Des tiges de maïs (variété *INRA 260*) et de blé (variété *Capitole*) provenant de dispositifs expérimentaux de la Station d'Agronomie de Bordeaux ont été prélevées tout de suite après la récolte du grain, mises à sécher à l'air, pulvérisées et intimement mélangées au sol à raison de 2 p. 100 en poids. Le sulfate ferreux a été ajouté en quantité équivalant à 200 mg de fer par kg de terre. L'addition de chaque type de poudre végétale a été réalisée selon les six modalités suivantes :

1. Incorporation de la poudre végétale seule, la veille du semis du Lupin ;
2. Incorporation de la poudre végétale et du sulfate ferreux la veille du semis ;
3. Incorporation de la poudre végétale seule, 60 jours avant le semis du Lupin, les sols étant maintenus en permanence à 60 p. 100 de la capacité maximum de rétention en eau jusqu'au moment du semis ;
4. Incorporation de la poudre végétale et du sulfate ferreux, 60 jours avant le semis, les sols étant maintenus en permanence à 60 p. 100 de la capacité maximum de rétention en eau jusqu'au moment du semis ;

5. Incorporation de la poudre végétale seule préalablement fermentée à l'étuve, la veille du semis du Lupin ;
6. Incorporation de la poudre végétale, préalablement fermentée à l'étuve en présence de sulfate ferreux, la veille du semis du Lupin.

A ces douze traitements, répétés chacun 4 fois, correspondant d'une part aux tiges de maïs et d'autre part aux pailles de blé, on a ajouté : un traitement ne comprenant ni apport de sulfate ferreux ni apport de poudre végétale (traitement témoin), un traitement correspondant à l'apport de sulfate ferreux et un traitement correspondant à l'apport d'un chélate de synthèse (EDDHA-Fe) à raison de 200 mg par kg de terre.

La fermentation des poudres végétales s'est déroulée dans une étuve réglée à 35°C ; la quantité de poudre végétale nécessaire à la réalisation des traitements 5 et 6 a été étalée dans des plateaux de matière plastique sur une épaisseur de 1 cm environ, et mélangée ou non selon le cas avec la quantité de sulfate ferreux nécessaire. Les poudres ont été maintenues humides durant toute la durée de la fermentation par des arrosages fréquents. Après 60 jours, elles ont été séchées à l'air et réhomogénéisées avant d'être mélangées à la terre. La composition minérale des différentes poudres ainsi obtenues est indiquée dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Composition minérale moyenne des différentes poudres végétales

Nature de la poudre	En p. 100 de matière sèche				Fer (mg/kg de mat. sèche)
	K	Ca	Mg	P_2O_5	
Tiges de maïs	1,00	0,60	0,28	0,14	198
Tiges de maïs fermentées	1,17	0,74	0,33	0,21	338
Tiges de maïs fermentées + $FeSO_4$	1,15	0,75	0,42	0,21	16800
Paille de blé	0,96	0,62	0,09	0,33	74
Paille de blé fermentée	1,13	0,42	0,06	0,28	356
Paille de blé fermentée + $FeSO_4$	0,99	0,41	0,09	0,28	14300

Tous les pots ont reçu une fumure minérale équivalant à 400 unités/ha de potasse, d'acide phosphorique et d'azote, et ont été maintenus à 60 p. 100 de la capacité maximum de rétention en eau pendant toute la durée de la culture (6 semaines).

La veille de la récolte, on a procédé à une estimation de l'intensité moyenne de la chlorose en effectuant un dosage de chlorophylle sur les plantes de chaque pot.

Les plantes récoltées ont été séchées à l'étuve et pulvérisées ; sur les poudres obtenues, on a procédé à la détermination de la teneur en fer, en acide phosphorique, ainsi qu'en potassium, calcium et magnésium. Le pH et la teneur en fer extractible des sols ont également été mesurés.

Les techniques suivantes ont été utilisées :

— *Dosage de la chlorophylle.*

La feuille centrale de chaque bouquet constituant le 4e étage foliaire est broyée dans un mortier de verre en présence de quelques ml d'acétone, et ceci plusieurs fois jusqu'à décoloration totale des tissus, en utilisant au maximum 40 ml d'acétone. Le filtrat est ajusté à 50 ml et on mesure la densité optique à 652 nm. La teneur en chlorophylle est donnée par la formule (en p. 1 000 par rapport à la matière fraîche) :

$$T = 28{,}99 \times \text{Densité optique.}$$

— *Dosage de l'acide phosphorique, du fer et des alcalins et alcalino-terreux.*

Les poudres végétales sont minéralisées par voie sèche ; les cendres sont reprises à chaud par de l'acide chlorhydrique pur et l'on dose l'acide phosphorique dans le filtrat par colorimétrie du complexe phosphomolybdique réduit par l'acide ascorbique (Duval, 1962). Le potassium, le calcium, le magnésium et le fer sont dosés à partir de la même solution par absorption atomique, après dilution avec du chlorure de lanthane.

— *Dosage du fer extractible du sol.*

2 g de sol passant au tamis de 350 μ sont agités pendant 2 heures au contact d'une solution d'oxalate d'ammonium N/5 ; après filtration, le fer est dosé dans cette solution par colorimétrie du complexe orthophénantroline-fer.

III. — RÉSULTATS

L'ensemble des résultats de cet essai a été traité statistiquement selon la méthode des comparaisons orthogonales (tabl. 3) qui permet de faire ressortir les effets simples et les interactions des principaux paramètres étudiés sur les déterminations réalisées :

a) *Effet matière organique.* Comparaison des traitements témoins et sulfate de fer d'une part, et des 12 traitements dans lesquels il y a incorporation de matière organique, d'autre part.

b) *Effet fer.* Comparaison des traitements correspondant à un apport de fer sous forme de sulfate ferreux et des traitements sans apport de fer.

c) *Effet nature de la matière organique.* Comparaison des traitements dans lesquels il y a eu incorporation de tiges de maïs et des traitements dans lesquels il y a eu incorporation de tiges de blé.

d) *Effet de la fermentation.* Comparaison des traitements où les poudres végétales n'ont pas subi de fermentation avant le semis du Lupin et des traitements où les poudres végétales ont fermenté avant le semis (dans le sol ou à l'étuve).

e) *Effet du mode de fermentation.* Comparaison des traitements où les poudres végétales ont fermenté à l'étuve et des traitements où les poudres végétales ont fermenté dans le sol.

Le traitement EDDHA-Fe a été exclu de ce mode de calcul statistique.

Nous passerons successivement en revue l'action des différents paramètres étudiés sur les déterminations qui ont été effectuées au cours de ce travail.

1. — *Teneur en chlorophylle* (tabl. 4)

Les plantes qui n'ont reçu ni composé de fer ni matière organique sont très sérieusement chlorosées. Les poudres végétales incorporées au sol en même temps que le sulfate de fer entraînent un reverdissement très accusé des plantes, particulièrement net dans le cas des poudres préalablement fermentées à l'étuve en présence de fer. En l'absence de fer, l'addition de poudre au sol deux mois avant la mise en culture entraîne une diminution de la chlorose comparable à celle qui résulte du seul enrichissement en sulfate de fer.

Le tableau 3 montre qu'il y a un effet très hautement significatif de l'apport de matière organique, de fer et du mode de fermentation sur l'élévation de la teneur en chlorophylle du Lupin. Le tableau 4 précise le mode d'action de ces différents paramètres : en présence de fer, toutes les sources de matière organique conduisent à une augmentation de la teneur en chlorophylle du Lupin, que ces matières organiques soient ou non fermentées, et cette augmentation est beaucoup plus grande

TABLEAU 3

Degré de signification de l'effet des principaux paramètres étudiés sur les déterminations effectuées
(méthode des comparaisons orthogonales)

	MS (1)	Chloroph. (2)	K (2)	Ca (2)	Mg (2)	P_2O_5 (2)	Fe (2)	Fe extr. (3)	pH (3)
Blocs	0,52	2,53	0,82	0,82	0,44	1,16	4,18	1,02	0,41
Traitements	9,80**	28,64***	6,42*	13,11**	5,23*	41,90***	6,37*	71,47***	43,77***
a) Effet matière organique	7,17*	68,04***	2,29	90,01***	0,50	33,60***	39,96***	16,11***	12,85**
b) Effet fer	29,06***	185,57***	35,07***	15,14***	31,50***	213,70***	1,21	628,32***	163,28***
c) Effet nature mat. org.	1,79	0,92	27,12***	6,46*	8,50**	2,10	5,58*	9,72**	55,00***
d) Effet fermentation	15,17***	0,53	ε	0,19	3,70	4,50*	3,58	2,19	16,28***
e) Effet mode de ferment.	45,06***	36,75***	2,14	31,27***	2,40	145,80***	7,73**	79,49***	250,71***
Interaction *a*/*b*	0,03	ε	0,11	3,95	0,90	50,00***	0,65	2,05	ε
— *b*/*c*	0,31	1,77	2,97	3,64	1,00	6,00*	0,78	60,61***	10,71**
— *b*/*d*	11,19**	1,47	0,05	0,22	0,40	ε	4,65*	3,38	2,14
— *b*/*e*	12,88**	7,46**	11,29**	12,45**	0,60	43,50***	3,33	83,69***	3,71
— *c*/*d*	0,02	2,90	0,67	ε	0,80	8,00**	6,97*	15,54***	0,71
— *c*/*e*	1,38	1,71	ε	2,20	1,80	5,50*	0,55	21,07***	13,42***
— *b*/*c*/*d*	0,12	4,44*	1,68	1,81	0,60	6,30*	6,64*	0,38	9,71**
— *b*/*c*/*e*	2,66	ε	0,05	3,06	0,20	0,40	0,96	6,29*	12,42**

* Significatif (seuil de 5 p. 100) ; ** Très significatif (seuil de 1 p. 100) ; *** Très hautement significatif (seuil de 1 p. 1 000).
(1) Production de matière sèche ; (2) Composition minérale du Lupin ; (3) Caractéristiques du sol.

que celle observée en appliquant simplement du sulfate ferreux. En l'absence de fer, l'addition de matières organiques augmente aussi, dans une moindre mesure, la teneur en chlorophylle des plantes par rapport au témoin, exception faite cependant des poudres végétales fermentées à l'étuve qui n'exercent aucune action, ce qui explique la haute signification de l'effet mode de fermentation mis en évidence par l'interprétation statistique. On constate également qu'en l'absence de fer la fermentation préalable des poudres végétales dans le sol conduit à des teneurs en chlorophylle significativement supérieures à celles obtenues par la seule addition de sulfate ferreux.

TABLEAU 4

Influence des différents traitements sur la teneur en chlorophylle du Lupin

Principaux paramètres étudiés		Traitements	Chlorophylle p. 1 000 matière fraîche
Sans matière organique		Témoin	7,0
		$FeSO_4$	13,2
Avec matière organique			
Avec fer	Paille de blé	non fermenté	17,7
		fermenté sol	18,7
		fermenté étuve	21,1
	Tiges de maïs	non fermenté	19,2
		fermenté sol	17,1
		fermenté étuve	17,8
Sans fer	Paille de blé	non fermenté	13,1
		fermenté sol	15,9
		fermenté étuve	7,9
	Tiges de maïs	non fermenté	13,0
		fermenté sol	17,0
		fermenté étuve	7,4
		EDDHA-Fe	26,6
		p.p.d.s. 5 p. 100	2,4
		p.p.d.s. 1 p. 100	3,8

2. — *Production de matière sèche* (tabl. 3 et 5)

On constate l'existence d'un certain parallélisme entre les teneurs en chlorophylle et la production de matière sèche ; il faut cependant que les matières organiques aient fermenté dans le sol durant 2 mois pour qu'il y ait un accroissement significatif de la production de matière sèche par rapport aux traitements de référence (témoin ou sulfate de fer seul). Ce résultat est à l'origine de la très haute signification de l'effet fermentation, celle du mode de fermentation s'expliquant par le fait que les poudres fermentées à l'étuve ne modifient pratiquement pas les rendements, notamment en l'absence de fer (interaction fer-mode de fermentation très significative).

TABLEAU 5

Influence des différents traitements sur la production et la composition minérale du Lupin

Principaux paramètres étudiés	Traitements	Matière sèche (g/pot)	K p. 100 mat. sèche	Ca p. 100 mat. sèche	Mg p. 100 mat. sèche	P_2O_5 p. 100 mat. sèche	Fe mg/kg mat. sèche
Sans matière organique	Témoin	4,80	3,34	2,03	0,24	0,63	69
	$FeSO_4$	5,61	2,71	1,59	0,18	0,36	74
Avec matière organique							
• Avec fer :							
– Paille de blé	non fermenté	5,53	2,36	0,99	0,19	0,37	56
	fermenté sol	6,93	2,24	0,95	0,18	0,36	51
	fermenté étuve	6,28	1,99	0,87	0,12	0,38	62
– Tiges de maïs	non fermenté	5,14	2,76	1,12	0,18	0,37	58
	fermenté sol	6,62	3,08	1,03	0,22	0,34	54
	fermenté étuve	6,13	2,86	1,38	0,19	0,43	64
• Sans fer :							
– Paille de blé	non fermenté	5,34	2,86	1,11	0,22	0,53	65
	fermenté sol	6,15	2,62	0,92	0,21	0,38	48
	fermenté étuve	4,78	3,26	1,54	0,21	0,57	48
– Tiges de maïs	non fermenté	5,27	3,28	1,24	0,26	0,42	57
	fermenté sol	6,53	2,98	0,93	0,21	0,36	57
	fermenté étuve	4,12	3,54	1,51	0,23	0,58	63
	EDDHA-Fe	7,03	1,97	1,12	0,14	0,44	109
	p.p.d.s. 5 p. 100	0,71	0,51	0,09	0,04	0,04	9
	— 1 p. 100	0,95	0,68	0,12	0,06	0,06	12

3. — *Teneur en fer* (tabl. 3 et 5)

Le seul effet très hautement significatif qui se dégage est celui de la matière organique : on observe en effet que cette dernière entraîne une diminution significative de la teneur en fer du Lupin ; cette diminution est particulièrement nette dans le cas où les matières organiques sont incorporées avec le sulfate ferreux, notamment quand elles ont fermenté dans le sol, ce qui est à l'origine du caractère très significatif de l'effet mode de fermentation L'amélioration de l'état chlorotique des plantes et l'accroissement de production de matière sèche ne vont donc pas de pair avec une élévation de la teneur en fer — ce qui n'est pas surprenant, de nombreux auteurs ayant montré que la teneur en fer des plantes chlorosées est souvent supérieure à celle des plantes saines. Seul, le chélate a très fortement augmenté la teneur en fer, ce qui s'explique sans doute par le fait que la dose employée a été très largement supérieure à celle utilisée habituellement, autorisant une certaine « consommation de luxe » en cet élément.

4. — *Teneurs en bases et en acide phosphorique* (tabl. 3 et 5)

En ce qui concerne le calcium, le calcul statistique permet de dégager un effet très hautement significatif de la matière organique, du fer et du mode de fermentation. La teneur en cet élément est en effet très nettement diminuée par l'application des matières organiques ainsi que par celle du sulfate ferreux. La chute de la teneur en calcium est cependant moins nette dans le cas des poudres fermentées à l'étuve, ce qui explique l'effet hautement significatif du mode de fermentation.

Dans le cas du magnésium, il n'y a pas d'effet de la matière organique ; par contre, l'application de fer diminue dans tous les cas la teneur des plantes en cet élément.

Pour le potassium, il y a un effet hautement significatif du fer et de la nature de la matière organique : l'incorporation de fer en présence ou en l'absence de matière organique diminue en effet la teneur en potassium des végétaux. Les plantes qui se sont développées dans les pots enrichis avec de la poudre de tiges de maïs sont plus riches en potassium que celles des pots additionnés de poudre de tiges de blé, ce qui explique l'effet hautement significatif de la nature de la matière organique.

L'incorporation de fer et de matière organique exerce un effet très hautement significatif sur la teneur en acide phosphorique du Lupin : le tableau 5 montre en effet qu'il y a diminution de la concentration en cet élément chez les plantes provenant des pots enrichis avec du fer ou de la matière organique ; en l'absence de fer, la baisse de la teneur en acide phosphorique due à l'addition des matières organiques est cependant beaucoup plus importante que celle que l'on observe quand la matière organique est ajoutée au sol en même temps que le fer (interaction fer-matière organique hautement significative). L'effet mode de fermentation apparaît surtout en l'absence de fer (interaction mode de fermentation-fer), les poudres fermentées à l'étuve ne diminuant que très peu la teneur en acide phosphorique du Lupin, de même qu'elles ne modifient que très peu les rendements et la teneur en chlorophylle.

5. — *pH et fer extractible des sols* (tabl. 3 et 6)

pH.

Les effets du fer, de la matière organique, de la fermentation et du mode de fermentation sont très hautement significatifs : l'addition de $FeSO_4$ entraîne en effet une baisse importante du pH ; avec les poudres organiques, cette acidification due au fer est plus accusée dans le cas de la poudre de blé, ce qui est à l'origine de l'effet hautement significatif de la nature de la matière organique. On constate que le mode de fermentation joue bien un rôle primordial puisque la fermentation des poudres dans le sol donne lieu à une augmentation significative du pH par rapport aux traitements qui n'ont pas reçu d'amendement organique, et cela qu'il y ait ou non présence de fer, alors qu'au contraire la fermentation des poudres à l'étuve a entraîné une baisse significative du pH. Cette action du mode de fermentation sur l'évolution du pH est cependant beaucoup plus nette dans le cas de la poudre de blé, ce qui explique l'interaction hautement significative (nature de la matière organique et mode de fermentation). L'augmentation du pH observée à la suite de la fermentation des poudres dans le sol est vraisemblablement due à la production de bicarbonates, consécutive à l'action du gaz carbonique provenant de la fermentation de résidus végétaux, sur le calcaire.

TABLEAU 6

Influence des différents traitements sur le pH eau et la teneur en fer extractible du sol

Principaux paramètres étudiés		Traitements	pH	Fer extractible (mg/kg)
Sans matière organique		Témoin	7,88	24
		$FeSO_4$	7,78	59
Avec matière organique				
Avec fer	Paille de blé	non fermenté	7,66	53
		fermenté sol	7,80	38
		fermenté étuve	7,67	79
	Tiges de maïs	non fermenté	7,78	45
		fermenté sol	7,86	32
		fermenté étuve	7,73	50
Sans fer	Paille de blé	non fermenté	7,82	15
		fermenté sol	7,94	15
		fermenté étuve	7,71	18
	Tiges de maïs	non fermenté	7,83	30
		fermenté sol	7,92	21
		fermenté étuve	7,82	17
		EDDHA-Fe	7,92	31
		p.p.d.s. 5 p. 100	0,03	6
		p.p.d.s. 1 p. 100	0,05	9

Fer extractible.

Les effets hautement significatifs sont ceux du fer, de la matière organique et du mode de fermentation : l'addition de fer élève en effet fortement la teneur en fer extractible du sol, ce qui était prévisible ; en présence de matières organiques, cette augmentation est cependant plus importante quand les poudres végétales ont fermenté à l'étuve (effet mode de fermentation), et cela notamment pour les poudres de tiges de blé (interaction mode de fermentation-nature de la matière organique). On observe également qu'en l'absence de fer, l'addition de matière organique, et principalement de la paille de blé, provoque une forte baisse de la teneur en fer extractible, ce qui explique l'effet hautement significatif de la matière organique.

IV. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les plantes qui se sont développées dans les pots non enrichis en fer ou en poudre végétale présentent les symptômes d'une chlorose ferrique intense, que l'on peut mesurer par la chute importante de leur teneur en chlorophylle totale. On constate une amélioration sensible de cet état chlorotique par la seule addition de sulfate de

er, mais l'amélioration est beaucoup plus sensible quand le sulfate est ajouté au sol en même temps que les matières organiques.

Le résultat le plus important auquel conduit cette expérience est que, sans addition d'un composé de fer, on peut parvenir à une guérison quasi-totale de la chlorose en laissant préalablement fermenter dans le sol, durant deux mois, la poudre de paille de blé ou de tiges de maïs.

Cette amélioration de l'état chlorotique du Lupin est confirmée par l'évolution de la composition minérale des plantes, qui est tout à fait conforme à celle observée par de nombreux auteurs (GOUNY et MAZOYER, 1953 ; CARLE *et al.*, 1963 ; RIBOUR, 1970) : on constate en effet que l'atténuation des symptômes de chlorose s'accompagne d'une baisse sensible de la teneur en bases (notamment en calcium) et en acide phosphorique des plantes. Il ne s'agit donc pas d'un effet de dilution due à une meilleure croissance des plantes, mais bien d'une modification de la nutrition provoquée par un changement de l'état chlorotique des plantes. On peut noter, dans cet ordre d'idées, que les poudres végétales fermentées à l'étuve et ajoutées au sol en l'absence de fer n'atténuent que très peu les symptômes de chlorose et n'ont qu'une faible action sur la composition minérale de la plante ; d'une manière générale, cette modification de la composition minérale du Lupin (diminution de la teneur en bases et en acide phosphorique) est donc d'autant plus nette que l'atténuation des symptômes de chlorose est importante. Les plus fortes teneurs en potassium des plantes qui se sont développées dans les pots enrichis avec la poudre de tiges de maïs sont vraisemblablement dues au fait que cet élément est plus facilement utilisable à partir des résidus de maïs que de ceux du blé.

Le mécanisme permettant d'expliquer l'atténuation notable des symptômes de chlorose à la suite de l'incorporation et de la fermentation préalable dans le sol de résidus végétaux très fermentescibles, comme les tiges de maïs ou la paille de blé, est difficile à élucider : on ne peut en effet invoquer une acidification du milieu, l'addition de résidus végétaux et leur incubation dans le sol ayant tendance tout au contraire à en augmenter le pH. On peut, par contre, imaginer que la décomposition des matières organiques favorise la mise en solution du fer préexistant (cas des poudres incorporées seules) ou de celui ajouté sous forme de sulfate de fer en favorisant sa réduction, phénomène qui pourrait être intensifié par le maintien du sol en anaérobiose pendant un certain temps, comme l'ont montré SIEW-KEE et BLOMFIELD (1962), ELLIOT et BLAYLOCK (1969) et OKAJIMA *et al.* (1970). Si cette hypothèse s'avérait exacte, l'incorporation au sol de matières organiques aurait dû conduire à des teneurs en fer extractible beaucoup plus importantes que celles mesurées en l'absence d'incorporation ; or, là encore, c'est l'inverse que l'on constate. Il faut donc admettre : soit que la technique de détermination du fer extractible utilisée n'est pas satisfaisante, soit que ce n'est pas un mécanisme de ce genre (réduction et mise en solution du fer) qui intervient.

Une autre hypothèse est celle qui envisagerait la production de substances complexantes par les micro-organismes qui se développent dans le sol à la suite de l'incorporation de substances éminemment fermentescibles comme les poudres de tiges de blé ou de maïs. BARBER (1973), BARBER et LEE (1974), ont montré l'influence extrêmement bénéfique des micro-organismes du sol sur l'absorption non seulement des éléments majeurs mais aussi des oligo-éléments, et en particulier du fer. De même, RIBEIRO *et al.* (1973) ont constaté que la stimulation de la flore microbienne

par addition au sol de métabolites très facilement biodégradables (glucose et saccharose notamment) pouvait entraîner la solubilisation d'une fraction importante du fer contenu dans une roche basique ; ces mêmes auteurs ont aussi observé que, dans certaines conditions, la stimulation de la flore microbienne par addition au milieu d'une solution moins riche en substances biodégradables (extrait aqueux de litière non stérilisé, par exemple) pouvait tout au contraire diminuer la quantité de fer facilement extractible. Il est probable qu'un mécanisme de ce genre est intervenu au cours de la présente expérience, par exemple : production en faibles quantités de substances d'origine microbienne chélatant fortement le fer et permettant sa meilleure utilisation par la plante et, simultanément, immobilisation biologique d'une autre fraction plus importante, ce qui expliquerait la diminution de la teneur en fer extractible observée après l'addition au sol de matières organiques.

Quoi qu'il en soit, ce travail démontre que l'incorporation au sol de tiges de maïs ou de céréales broyées, suivie d'une période de fermentation, permet d'atténuer considérablement l'état chlorotique du Lupin ; ce résultat est à rapprocher dans une certaine mesure de celui constaté par LACHICA *et al.* (1972), qui ont montré que l'utilisation de « tourbe activée » obtenue par mélange d'une tourbe alcaline avec de la paille de céréales, ou l'utilisation de pailles de céréales fermentées à l'étuve puis remises à incuber dans le sol, permettait d'améliorer considérablement la nutrition en oligo-éléments de plantules de blé.

V. — CONCLUSION

Contrairement aux observations faites par certains auteurs, l'expérience décrite dans ce travail montre que l'incorporation de certaines formes de matières organiques permet, dans la mesure où cette incorporation est séparée de la mise en culture par une période suffisamment longue, de diminuer le pouvoir chlorosant d'un sol calcaire, beaucoup plus efficacement qu'en ajoutant à ce dernier une quantité de fer de l'ordre de 200 mg/kg de terre sous forme de sulfate ferreux.

Le mécanisme permettant d'expliquer cet effet particulier de la matière organique demeure obscur car il ne paraît pas possible de faire appel à une solubilisation notable du fer du sol par les processus maintenant assez bien connus de réduction ou de complexation. Il est possible cependant d'émettre l'hypothèse d'une stimulation de la flore microbienne du sol, laquelle pourrait jouer un rôle important dans l'absorption du fer, notamment par la production de complexes organo-métalliques très facilement utilisables par le végétal mais produites en quantités trop faibles pour être mises en évidence par un réactif d'extraction. Cette observation souligne l'intérêt que revêtent certains types de recherches analogues à celle entreprise par BARBER (1973-1974), recherches qui devraient permettre de mieux préciser le rôle vraisemblablement déterminant que jouent les micro-organismes présents dans la rhizosphère sur l'absorption des éléments nutritifs et notamment des oligo-éléments.

Sur le plan pratique, cette expérience montre qu'il est possible d'améliorer l'efficacité de composés minéraux du fer comme le sulfate ferreux qui sont déjà utilisés à grande échelle pour le traitement de la chlorose ferrique dans certaines régions

viticoles françaises, où l'emploi de chélates de synthèse ne peut être envisagé à cause de leur prix trop élevé, en ajoutant au sol (deux à trois mois avant le début de la phase active de développement de la plante) certaines formes de matières organiques.

Reçu pour publication en janvier 1975.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement M. Boussion, de la Station de Recherches de Viticulture, Centre de Recherches de Bordeaux (I. N. R. A.), pour l'aide très efficace qu'il nous a apportée pour le traitement statistique des résultats.

SUMMARY

THE EFFECT OF THE INCORPORATION OF CERTAIN FORMS OF ORGANIC MATTER ON THE CHLOROTIS CAPACITY OF A CHALKY SOIL

In a trial using as test-plant the white Lupin (*Lupinus albus*) in plant containers, the effect of adding iron sulphate and different sources of organic matter (maize stems and wheat straw), incorporated directly or previously fermented (in a fermenter or in the soil), on the changes in the chlorosis capacity of a chalky soil was measured. It was observed that in the absence of iron sulphate, the preliminary fermentation of plant residues in the soil considerably reduces the plants' chlorotic condition and increases dry matter production. The anti-chlorosis action of iron sulphate is greatly enhanced when the iron sulphate is incorporated into the soil at the same time as the plant residues.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS DER ZUGABE VON BESTIMMTEN FORMEN VON ORGANISCHER SUBSTANZ AUF DEN VERGILBUNGSEFFEKT EINES KALKBODENS

In einem Gefässversuch mit weisser Lupine (*Lupinus albus*) wurde die Wirkung gemessen, die die Zugabe von Eisensulfat und von organischem Material von verschiedener Herkunft (Maisstengel und Stroh), direkt eingebracht oder vorgängig vergoren (im Boden oder in der Dörrkammer) auf die Veränderung des Vergilbungseffekts eines Kalkbodens hat. Es wurde festgestellt, dass bei Abwesenheit des Eisensulfats die vorherige Fermentation der Pflanzenrückstände im Boden die Chlorose der Pflanzen beträchtlich vermindert und die Produktion von Trockensubstanz vergrössert. Die antichlorotische Wirkung des Eisensulfats wird sehr verstärkt, wenn es zur gleichen Zeit wie die Pflanzenrückstände in den Boden eingebracht wird.

РЕЗЮМЕ

Влияние некоторых форм органического вещества на силу хлороза вызываемого известковой почвой.

К. КУРПРОН, К. ЖЮСТ

В вегетационных опытах с белым люпином (*Lupinus alba*) изучалось влияние прибавления в почву сернокислого железа и различных, интактных, или перебродивших в термостате, или в почве, источников органи-

ческого вещества (кукурузные стебли и пшеничная солома) на изменения силы хлороза вызываемого известковой почвой... Отмечено, что в отсутствии сернокислого железа, предварительное брожение растительных остатков в почве, ослабляет силу хлороза растений и увеличивает продукцию сухого вещества. Противо-хлорозный эффект сернокислого железа, при его совместном внесении в почву с растительными остатками, усиляет тенденцию к еще большему увеличению этой продукции.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBER D. A., 1973. Effect of micro-organisms on the absorption of inorganic nutrients by plants. *Pestic. Sci.*, **4**, 367-373.

BARBER D. A., LEE R. B., 1974. The effect of micro-organisms on the absorption of manganese by plants. *New Phytol.*, **73**, 97-106.

CARLES J., LATTES F., ALQUIER-BOUFFARD A., 1963. Des effets de la chlorose calcaire sur la répartition des acides organiques et des éléments minéraux et de l'importance du pétiole dans cette répartition. *Bull. Soc. Fr. Physiol. Vég.*, 165-174.

COSTE-FLORET P., 1895. Notes sur la chlorose calcaire. *Pr. Agr. et Vit.*, 498-503, 517-522.

COURPRON C., 1971. Détermination de la constante de stabilité des complexes formés entre le fer et les substances contenues dans l'extrait aqueux de résidus de végétaux d'origines diverses. *Ann. agron.*, **22**, 527-536.

DUVAL L., 1962. Dosage céruléo-molybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Ann. agron.*, **13**, 469-482.

ELLIOT L. F., BLAYLOCK J. W., 1969. Effect of micro-organisms on cation movement in the soil. *Agron. Abstr.*, **90**.

GOUNY P., MAZOYER R., 1953. Relations entre la nutrition minérale et les symptômes pathologiques dans la chlorose calcaire. *Ann. agron.*, 567-598.

JUSTE C., POUGET R., 1967. Influence des exsorbats radiculaires de Vigne sur le maintien en solution du fer à pH élevé en présence ou en l'absence de calcium. *C. R. Acad. Agric.*, 85-90.

KLIMAN S., 1937. The importance of ferrous iron in plants and soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **37**, 385-392.

LACHICA M., YANEZ J., CALDERON N. G., GALLARDO F., 1972. Valor fertilizante de una turba activada. *Agrochimica*, XVI, 323-329.

MILLER R. H., OHLROGGE A. J., 1958. Water soluble chelating agents in organic materials : influence of chelate-containing materials on the mobility of trace metals to plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 228-231.

OKAJIMA H., MANNIKAR D. D., JAGANMOHAN RAO M., 1970. Iron chlorosis of rice seedlings in calcareous soils under upland conditions. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, **16**, 128-132.

RIBEIRO R. M., MOUREAUX C., MUSSI SANTOS A., 1973. Action des microorganismes sur l'altération d'une roche basique. *Cah. O. R. S. T. O. M.*, XI, 57-64.

RIBOUR B., 1970. Influence du facteur eau et de certaines techniques culturales sur l'induction de la chlorose en sol calcaire. *Mémoire Ing. E. N. I. T. A.*, Bordeaux, sept. 1970, 63 p.

SIEW-KEE N., BLOOMFIELD C., 1962. The effect of flooding and aeration on the mobility of certain trace-elements in soils. *Plant and Soil*, XVI, 108-138.

WALLACE A., LUNT O. R., 1960. Iron chlorosis in horticultural plants. A review. *Amer. Soc. for Horticult. Sci.*, 819-841.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Agronomie.

annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (3), 229-243.

ÉTUDE PHYSIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LES CONDITIONS NATURELLES

III. — ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE ET POTENTIELLE DES COUVERTS VÉGÉTAUX

A. PERRIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Au cours des deux chapitres précédents, le cas des couverts à fort développement vertical n'avait pas été abordé. Si l'on cherche à appliquer à ce type de couverts les notions bien définies aux chapitres précédents — évapotranspiration potentielle, température de surface et de rosée à la surface — il est nécessaire de considérer ces valeurs au niveau Z_h supérieur du couvert et d'introduire une évapotranspiration potentielle fictive à ce niveau. L'évapotranspiration potentielle du couvert se définit alors comme précédemment, mais fait intervenir une résistance propre à l'architecture du couvert. Quant à l'évapotranspiration réelle, elle fait donc intervenir une double résistance : résistance propre à l'architecture et celle due aux diverses régulations stomatiques. Un schéma à trois résistances (air — structure du couvert — régulations stomatiques) semble s'imposer pour traiter de façon simplifiée les couverts végétaux et confirme un certain nombre de résultats concernant la variation des évapotranspirations en fonction des facteurs climatiques et des différents couverts.

La plupart des couverts végétaux présentent un certain développement vertical. Cette caractéristique les éloigne d'autant plus du cas de la surface plane « mince » étudié précédemment (chap. II) que la hauteur du couvert est plus grande. Seule la présence d'une très forte densité de surface de feuilles au sommet de la végétation — qui comprendrait pratiquement la majorité des feuilles du couvert — tendrait à ramener ce type de couvert au cas précédent d'une surface « mince » placée à la hauteur z_h du couvert. Généralement cependant, les couverts s'éloignent très fortement de ces conditions, aussi jouent-ils un rôle dominant sur les échanges, d'une part par leur hauteur, et d'autre part en fonction de la répartition de leurs surfaces foliaires selon cette hauteur. C'est à partir de ces caractéristiques que nous chercherons de façon très schématique à traduire les valeurs d'évapotranspiration et leur évolution.

LISTE DES SYMBOLES (III)

a Albédo moyen du couvert

c_p Chaleur massique de l'air (J kg^{-1} °C^{-1})

γ Constante psychrométrique $\left(\gamma = \frac{\rho c_p RTh}{LMH} \text{ en } Pa\ °C^{-1}\right)$

γ_r Rapport entre coefficient d'échange radiatif et convectif $\left(\gamma_r = \frac{4\ \varepsilon\sigma T^4\ R}{LMH} \text{ en } Pa\ °C^{-1}\right)$

D Hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique (m)

E_a Évaporation de la surface si elle était à la température de l'air T_a ($E_a = H_o P'(T_a - T_r)$ en W m^{-2})

ETP Évapotranspiration potentielle fictive (W m^{-2})

ETP_o Évapotranspiration potentielle du couvert (W m^{-2})

ETR Évapotranspiration réelle au niveau de la surface (W m^{-2})

ETR_M Valeur maximale de ETR pour une culture bien irriguée (W m^{-2})

ε Émissivité moyenne du couvert

$F(z)$ Surface foliaire cumulée du sommet du couvert au niveau z par unité de surface de sol

$f(z)$ Densité de surface foliaire (m^{-1})

$\Phi_f(z)$, $\Phi_{fL}(z)$, $\Phi_{fs}(z)$ Densité locale de flux au niveau des feuilles (W m^{-2})

Φ_L Densité de flux de chaleur latente (W m^{-2})

Φ_{Lo} Densité de flux de chaleur latente pour une évaporation potentielle (W m^{-2})

Φ_s Densité de flux de chaleur sensible (W m^{-2})

Φ_c Densité de flux de chaleur par conduction à la suface du sol (W m^{-2})

H Coefficient d'échange convectif de masse (m s^{-1})

H_o Coefficient d'échange égal à $\frac{LM}{RT}$ H (m s^{-1})

h Coefficient d'échange convectif de chaleur (m s^{-1})

h_o Coefficient d'échange égal à $\rho\ c_p h$ (W m^{-2} °C^{-1})

$K(z)$ Diffusivité turbulente au niveau z (m^2 s^{-1})

k Constante de Karmann (0,39)

L Chaleur latente de vaporisation (J kg^{-1})

M Masse molaire de l'eau (18 10^{-3}, kg Mole^{-1})

P(T) Tension de vapeur saturante pour la température T (Pa)

P′ Dérivée de l'expression précédente pour $(T_s + T_r)/2$ (Pa °C^{-1})

R Constante des gaz parfaits (8,32)

Ra Rayonnement atmosphérique (densité de flux radiatif) (W m^{-2})

Rg Rayonnement global (densité de flux) (W m^{-2})
Rn Rayonnement net pour la surface considérée dans un état donné (densité de flux) (W m^{-2})
Rn_* Rayonnement net « climatique » $(1 - a)\,Rg + \varepsilon(Ra - \sigma T_a^4)$ en W m^{-2}
r Somme de résistances (s m^{-1})
r_o Résistance fonction essentiellement de la structure du couvert (s m^{-1})
r_s Résistance fonction essentiellement de la régulation stomatique (s m^{-1})
r_c Résistance critique (s m^{-1})
ρ Masse volumique de l'air (kg m^{-3})
σ Constante de Stefan-Boltzman (W m^{-2} $°K^{-4}$)
T Température en °K
T_a Température de l'air au niveau de référence (°K)
T_{ho} Température qu'atteindrait l'air à la surface du couvert s'il y avait ETP fictif (°K)
T_r Température du point de rosée de l'air au niveau de référence (°K)
T_{rh} Température du point de rosée de l'air à la surface du couvert quand il y a ETR (°K)
T_{ro} Température du point de rosée de l'air à la surface du couvert quand il y a ETP_o (°K)
T_{sh} Température de l'air à la surface du couvert quand il y a ETR (°K)
T_{so} Température de l'air à la surface du couvert quand il y a ETP_o (°K)
u_* Vitesse de frottement pour la surface considérée (m s^{-1})
z Hauteur considérée au-dessus du sol (m)
z_h Hauteur du couvert (m)
z_R Hauteur de référence dans l'air (m).

I. — ANALYSE DU RÔLE DES CARACTÉRISTIQUES DES COUVERTS

A. — *Caractéristiques des couverts*

Un couvert peut se définir sous l'angle des échanges essentiellement par la répartition de sa densité de surface foliaire $f(z)$. En effet, la surface d'échange par unité de volume ou densité de surface foliaire est la quantité indispensable à connaître pour passer des densités locales de flux au niveau des feuilles $\Phi_f(z)$ à la densité de flux par unité de surface du couvert ou du sol (fig. 1) :

$$ETR = \int_o^{z_h} \Phi_{fL}(z)\, f(z)\, dz \qquad (1)$$

si $\Phi_{fL}(z)$ représente la densité de flux de chaleur latente pour une feuille au niveau z, et z_h la hauteur du couvert.

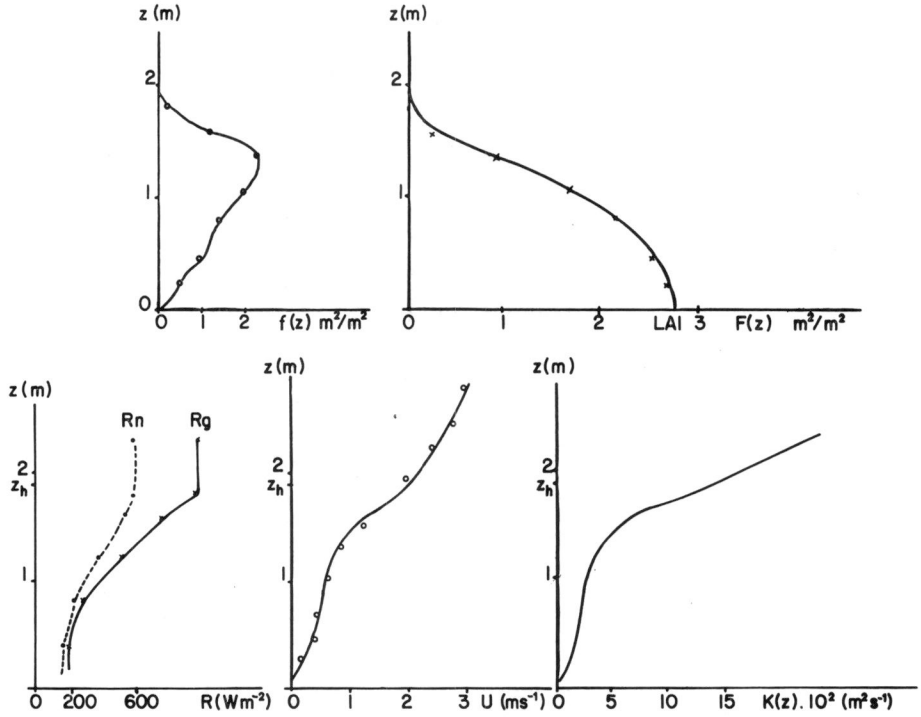


FIG. 1. — *Profils mesurés de densité de surface foliaire* f(z) (m^{-1}), *de surfaces foliaires cumulées à partir du sommet* z_h *de la végétation* $F(z)$, *du rayonnement net et du rayonnement global* Rn *et* Rg ($W\ m^{-2}$), *de la vitesse du vent* u(z) ($m\ s^{-1}$) *et profil calculé de la diffusivité turbulente* K(z) ($m^2\ s^{-1}$).

La surface foliaire totale (LAI) ne représente qu'un terme global insuffisant pour caractériser le couvert $\left(\text{LAI} = \int_o^{z_h} f(z)\ dz\right)$, mais la surface foliaire cumulée entre le niveau z_h et un niveau z (STERN et DONALD, 1962), soit $F(z)$, intervient dans plusieurs relations décrivant le rôle du couvert sur l'absorption de l'énergie ou sur le transfert d'énergie :

$$F(z) = -\int_{z_h}^{z} f(z)\ dz \qquad (2)$$

B. — *Rôle énergétique*

Le rôle principal de cette structure du couvert est de constituer un système poreux qui absorbe l'énergie radiative R*n* sur toute sa hauteur et de façon très différente suivant sa structure (fig. 1). Les échanges d'énergie sont donc localisés aux différents niveaux du couvert, et principalement en fonction de cette énergie radiative nette, disponible à chaque niveau, $Rn(z)$, dont la valeur dépend très directement de $F(z)$ (MONSI and SAEKI, 1953 ; ANDERSON, 1966 ; IMPENS et LEMEUR, 1969).

Le second rôle est celui que joue la structure sur les échanges turbulents dont dépendent l'évaporation et les échanges de chaleur sensible.

C. — *Rôle turbulent*

Les échanges turbulents sont affectés par le couvert à deux niveaux différents : celui des échanges entre le couvert et le milieu extérieur, coefficient H que nous avons rencontré aux chapitres précédents (I et II), et celui des diffusivités turbulentes K(z) au sein du couvert, terme qui régit les flux.

— Les échanges entre une surface et l'air considéré à son niveau de référence z_R se caractérisent par un coefficient d'échange H qui dépend de la vitesse du vent (caractéristique climatique) et aussi des paramètres de la surface, donc du couvert. Cette expression, utilisée par THORNTHWAITE (1948) puis par de très nombreux auteurs (TANNER, 1963 ; MONTEITH, 1963), dépend de la vitesse de frottement u_*, de la hauteur de déplacement D, de la culture (cf. chap. I) et des hauteurs considérées z_R et z_h :

$$H \sim h = ku_* \frac{1}{\text{Log} \dfrac{z_R - D}{z_h - D}} \qquad (k \text{ constante de Karmann}) \qquad (3)$$

L'expression de ce coefficient (PERRIER, 1967 et 1970) traduit strictement les échanges entre le niveau supérieur du couvert et le niveau de référence climatique.

— Au sein du couvert, les flux au niveau de chaque surface de la cote z dépendent de la vitesse locale du vent $u(z)$ et les échanges entre ce niveau z et le sommet z_h du couvert sont liés aux diffusivités turbulentes (PHILIP, 1964) (fig. 1). Dans ces deux cas, les paramètres déterminants sont encore la densité de surface foliaire f(z) et la surface foliaire cumulée F(z) (CIONCO, 1965 ; PERRIER, 1967).

Ces quelques considérations soulignent la complexité du rôle de la structure des couverts sur les échanges et finalement sur l'évapotranspiration réelle. Cependant, les aspects de type diffusion qui apparaissent aussi bien au niveau des feuilles

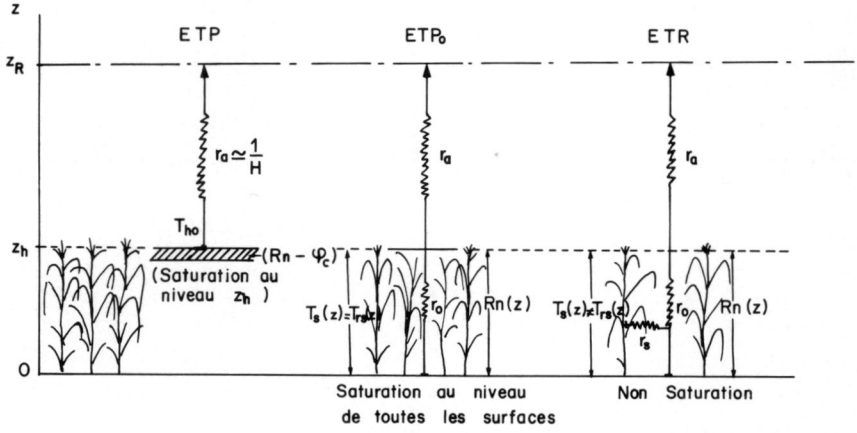


FIG. 2. — *Schéma des échanges dans les trois cas considérés et expression symbolique des résistances utilisées pour le modèle*

à travers les stomates qu'au sein de la masse poreuse du couvert dont nous venons de parler, ont conduit à rechercher un modèle du type résistance. Pour mieux séparer le rôle dominant des diverses parties du couvert et afin d'en mieux comprendre les mécanismes principaux, un schéma à trois niveaux (milieu aérien, milieu air-végétation, niveau stomates) a été retenu. Le schéma global donné par MONTEITH (1965) réduisant un couvert à un plan, c'est-à-dire aux cas traités précédemment (chap. II), a été abandonné, car il ne permet pas de traduire le rôle propre de la structure interne du couvert sur l'évapotranspiration potentielle. L'évapotranspiration potentielle est bien entendu définie comme précédemment, à partir de la notion physique et pratique de la saturation au niveau de toutes les surfaces d'échange (feuille et sol), et non pas de façon théorique (saturation au niveau d'un plan de référence représentant le couvert : MONTEITH, 1965). Ce schéma à trois niveaux (fig. 2) permet de suivre strictement la démarche déjà entreprise au chapitre précédent (II).

2. — DÉFINITION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE D'UN COUVERT

a) Appliquons tout d'abord la notion d'évapotranspiration potentielle à une surface fictive de cote z_h (hauteur du couvert) qui aurait toutes les propriétés du couvert considéré (même albedo, même coefficient d'échange H, même densité de flux de chaleur conductif Φ_c). Dans ce cas idéal (schéma de MONTEITH, mais pour un plan de hauteur z_h), l'analyse précédente (chap. I) est théoriquement valable pour la saturation à ce niveau et pour une énergie radiative nette, Rn, entièrement absorbée à ce même niveau (fig. 2 et 3). Cette analyse conduit à une expression purement virtuelle, car irréalisable, de l'évapotranspiration potentielle ETP et de la température d'équilibre qui en résulterait T_{ho}.

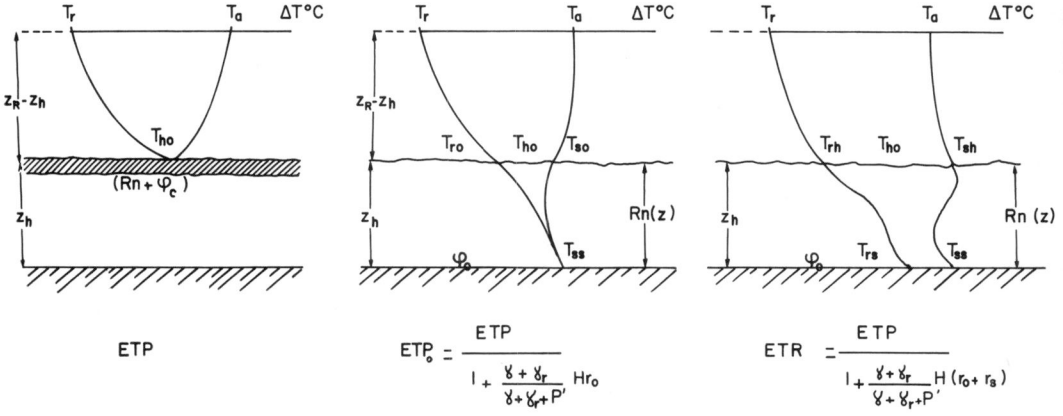


FIG. 3. — *Représentation schématique des profils de température de l'air et de la température du point de rosée de l'air dans les trois cas considérés* (T_a, température de référence de l'air ; T_r, température de référence du point de rosée de l'air) :

— ETP conduit à T_{ho}, température virtuelle d'équilibre au niveau z_h ;
— ETP_o conduit à T_{so} et T_{ro}, les températures d'équilibre de l'air et du point de rosée de l'air au niveau z_h. T_{ss}, la température de surface du sol (saturation) ;
— ETR conduit à T_{sh} et T_{rh}, les températures d'équilibre de l'air et du point de rosée de l'air au niveau z_h. T_{ss} et T_{rs}, les mêmes températures à la surface du sol.

$$\mathrm{ETP} = \frac{\mathrm{P}'(\mathrm{R}n_* + \Phi_c) + (\gamma + \gamma_r)\,\mathrm{E}_a}{\gamma + \gamma_r + \mathrm{P}'} \qquad (\text{avec } \mathrm{ETP} = -\Phi_\mathrm{L}) \qquad (4)$$

$$\mathrm{T}_{ho} = \mathrm{T}_r + \frac{\mathrm{ETP}}{\mathrm{H}_o\mathrm{P}'} \qquad (5)$$

Cette valeur très théorique d'ETP est celle qui correspond le plus à une définition climatique de l'évapotranspiration potentielle, puisqu'elle ne fait intervenir aucun paramètre propre à la structure interne du couvert (PENMAN et LONG, 1960) ; c'est une définition absolument semblable à celle de l'évapotranspiration potentielle des surfaces « minces » (chap. I et II). Cependant, cette valeur purement théorique ne peut en aucun cas être réalisée dans la pratique comme l'était la définition de l'évapotranspiration potentielle des surfaces « minces », puisque ni la saturation au niveau z_h, ni une absorption totale de Rn à ce même niveau ne sont réalisables.

b) Considérons, à présent, la notion vraie de l'évapotranspiration potentielle d'un couvert, celle qui résulterait (après une pluie ou une irrigation par aspersion) de l'évapotranspiration du couvert dont toutes les surfaces, y compris le sol, seraient à saturation (ETP_o réel du couvert). Contrairement au cas théorique précédent où l'énergie radiative Rn était supposée entièrement absorbée à la surface, l'énergie se répartit dans toute la végétation (§ 1, A et B), provoquant une évapotranspiration à tous les niveaux. Ainsi, la présence d'une évaporation à chaque niveau du couvert, avec saturation au niveau des surfaces d'échange y compris la surface du sol, entraîne des flux de vapeur d'eau de la profondeur du couvert vers la surface ; il n'y a donc généralement pas saturation de l'air aux différents niveaux et le profil de concentration en vapeur d'eau ou de température de point de rosée de l'air décroît de la surface du sol jusqu'au niveau de référence z_R. Les caractéristiques réelles de l'air au sommet z_h du couvert sont donc T_{so} et T_{ro} (température de l'air et température du point de rosée), dans le cas de l'évapotranspiration potentielle vraie, et différent de la valeur d'équilibre T_{ho} de l'évapotranspiration potentielle théorique (fig. 2 et 3).

Ainsi, dans le cas de l'évapotranspiration potentielle d'un couvert, tout se passe au niveau de sa surface comme si apparaissait un frein à l'évaporation potentielle théorique de la surface ; les caractéristiques thermiques passeraient alors de T_{ho}, la température d'équilibre du cas théorique, à T_{so}, la température d'équilibre, et T_{ro}, la température du point de rosée correspondant à la concentration d'équilibre : $\mathrm{T}_{ro} < \mathrm{T}_{ho} < \mathrm{T}_{so}$.

Ce frein de type « diffusion » est dû au fait que l'énergie radiative absorbée dans les parties basses du couvert, donc dans des zones de plus faible vitesse de vent, conduit à une évaporation moindre et que, d'autre part, un frein à la diffusion existe entre la profondeur et la surface (fig. 2).

Ce frein global, lié à la structure du couvert ou résistance propre au couvert r_o, conduit, compte tenu du bilan d'énergie et des expressions des densités de flux de chaleur latente Φ_L et sensible Φ_s (cf. chap. I et II), à l'expression classique de l'évapotranspiration avec résistance, mais qui exprime ici une évapotranspiration potentielle ETP_o :

$$\mathrm{ETP}_o = \frac{\mathrm{ETP}}{1 + \dfrac{\gamma + \gamma_r}{\gamma + \gamma_r + \mathrm{P}'}\,\mathrm{H}r_o} \qquad (\text{avec } \mathrm{ETP}_o = -\Phi_{\mathrm{L}o}) \qquad (6)$$

Les expressions des caractéristiques de surface se définissent ainsi (cf. chap. II) :

$$T_{so} = T_r + (T_{ho} - T_r) \frac{Hr_o + 1}{1 + \frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma + \gamma_r + P'} Hr_o} \tag{7}$$

$$T_{ro} = T_{ho} - \frac{\gamma + \gamma_r}{P'} (T_{so} - T_{ho}) \tag{8}$$

L'expression de l'évapotranspiration potentielle réelle ETP_o d'un couvert montre finalement que sa valeur suit exactement les mêmes lois que l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince » dans le cas d'une résistance à la diffusion. Il en découle que l'évapotranspiration potentielle d'un couvert évolue de façon classique par rapport aux facteurs climatiques, mais peut être considérablement réduite par rapport à ETP en fonction de la valeur de r_o (fig. 4). Cette réduction, d'autre part, connue dans le cas de ETR (couche « mince », chap. II), est assez différente suivant la valeur de la vitesse du vent et du coefficient d'échange H qui en découle.

En effet, suivant la valeur de r_o par rapport à la valeur critique

$$\left(r_c \sim \frac{LM}{RT} (\gamma + P') \frac{T_a - T_r}{Rn_* + \Phi_c}\right),$$

l'évolution d'ETP_o peut être rapide en fonction de l'accroissement de la vitesse du vent (r_o petit $\ll r_c$) ou très faible si r_o est voisin de r_c (pratiquement les valeurs de r_o ne permettent pas de dépasser de beaucoup les valeurs courantes de r_c) (cf. chap. II). L'évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal et son évolution vont donc dépendre de façon étroite de sa structure et de la valeur de sa résistance propre r_o.

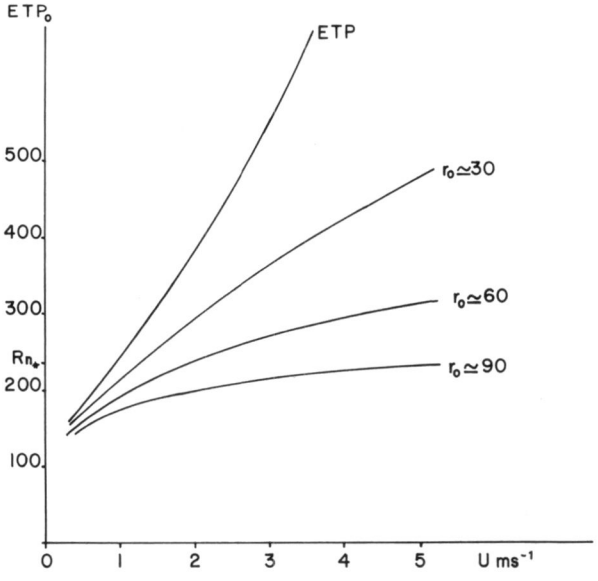


FIG. 4. — *Évolution calculée des évapotranspirations potentielles ETP_o pour des couverts de Maïs de résistances internes* r_o *différentes et de même coefficient H mesuré en fonction de la vitesse du vent* u (valeur du rayonnement net climatique environ 250 W m^{-2}).

Cependant, la notion d'évapotranspiration potentielle, introduite comme valeur indépendante des paramètres de régulation propre à la surface, ne se trouve plus tout à fait justifiée. Avec un couvert, intervient en effet une résistance r_o propre à la structure interne du couvert, comme dans le cas de l'ETR d'une surface mince. La seule valeur qui puisse jouer ce rôle d'évapotranspiration indépendante des caractéristiques internes est la valeur d'évapotranspiration potentielle climatique, ETP, qui, comme nous l'avons vu, n'a plus aucune signification réelle et n'est évidemment pas mesurable.

c) *Conclusions.*

La seule valeur réelle pratique de l'évapotranspiration potentielle d'une surface, valeur qui a une définition physique — évaporation de cette surface si toutes ses surfaces d'échange sont à saturation — est la définition des diverses valeurs d'ETP_o relatives aux différentes surfaces (chap. I, II et III).

Pour un couvert, cette valeur d'ETP_o est d'autant plus faible que la résistance du couvert est plus grande ; cette résistance croît avec la hauteur du couvert (frein plus important à la diffusion), avec sa densité (forte diminution des diffusivités turbulentes) et finalement aussi, avec une plus grande proportion d'énergie radiative absorbée dans les parties basses du couvert. Par contre, une forte densité, liée à une valeur élevée de la densité de surface foliaire dans la partie supérieure du couvert (ex. culture de haricot), tend à réduire globalement la résistance r_o et à conduire pratiquement au cas de l'évapotranspiration potentielle d'une surface « mince », qui correspond à la valeur maximale d'ETP_o par rapport à ETP ($ETP_o \simeq ETP$ pour r_o nul).

Le tableau I donne quelques valeurs moyennes soulignant bien la faible valeur de la résistance de structure pour un gazon ras et la forte croissance de cette résistance avec le développement vertical de la culture, réduisant d'autant la valeur d'ETP_o par rapport à ETP. Cependant, pour deux cultures voisines quant à la hauteur (Maïs 0,6 m et Haricot), la différence sensible de résistance de l'une par rapport

TABLEAU I

Valeurs moyennes des évapotranspirations potentielles (ETP, ETP_o) *et réelles* (ETR_M) *et des résistances de structure* (r_o) *de quelques couverts végétaux*

	Maïs 2,2 m	Maïs 0,6 m	Haricot	Gazon
ETP	800	550	500	450
ETP_o	550	450	450	425
ETP_o/ETP	0,70	0,80	0,90	0,95
r_o	20 à 30	10 à 15	5 à 10	0 à 5
ETR_M	300-350	350-380	360-380	380-400

à l'autre conduit à une évapotranspiration potentielle voisine, malgré la différence dans la valeur de ETP due au coefficient d'échange H. Une certaine compensation existe entre r_o et H qui augmentent tous deux avec la hauteur de la culture, accroissant la valeur de ETP mais réduisant le rapport ETP_o/ETP.

3. — ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE D'UN COUVERT

La différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle d'un couvert n'est autre qu'une différence dans les valeurs d'équilibre au niveau des surfaces d'échange. A la saturation, fait place un certain déficit dû aux résistances stomatiques de toutes les feuilles (MILTHORPE and PENMAN, 1967). Généralement, toutes autres conditions climatiques restant égales, ces résistances tendent à être inférieures dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique des plantes, ce qui conduit à l'évapotranspiration réelle maximale d'une culture ETR_M, dont une mesure directe peut s'effectuer à l'aide d'évapotranspiromètres précis bien alimentés en eau (PERRIER *et al.*, 1974).

Dans ce cas, suivant le même principe de calcul, où, en plus de r_o, apparaît un terme global de résistance pour la culture, r_s (traduisant l'effet de frein dû à la régulation stomatique au niveau de toutes les surfaces évaporantes) (VAN BAVEL, 1967), l'évapotranspiration réelle d'une culture s'exprime par :

$$ETR = \frac{ETP}{1 + \frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma + \gamma_r + P'} H(r_o + r_s)} \qquad (9)$$

Cette réduction de l'évapotranspiration potentielle, fonction de la valeur de r_s, conduit à des valeurs réelles des caractéristiques de l'air au sommet du couvert, $T_{sh} > T_{so}$ et $T_{rh} < T_{ro}$ qui sont données par les relations 7 et 8 où r_o est remplacé par la valeur $r_o + r_s$.

De façon générale, la mesure directe des valeurs de la température de l'air au sommet du couvert T_{sh} et de la température du point de rosée de l'air T_{rh} permet de déterminer r_o (après une pluie) ou $(r_o + r_s)$ par la relation déduite de 9 :

$$r_o \text{ ou } (r_o + r_s) = \frac{\gamma + \gamma_r + P'}{\gamma + \gamma_r} \frac{(T_{ho} - T_r) - (T_{rh} - T_r)}{T_{rh} - T_r} \frac{1}{H} \qquad (10)$$

(avec $T_{ho} - T_r$ donné par la relation 5).

Cette détermination permet de chiffrer, pour les conditions climatiques données, le rôle strict du couvert r_o sur la valeur de l'évapotranspiration potentielle ETP_o et le rôle des régulations stomatiques r_s conduisant à ETR. Cette réduction d'ETP_o, due à $r_o + r_s$ dont la valeur tend toujours à se rapprocher de la valeur critique r_c, explique aussi pourquoi même les valeurs d'évapotranspiration maximale ETR_M évoluent peu en fonction de la vitesse du vent, contrairement à ETP et ETP_o, et pourquoi l'évapotranspiration tend à prendre, dans ce cas, une valeur proche du premier terme de la formule de PENMAN $\left(\frac{P'}{P' + \gamma} (Rn_* + \Phi_c)\right)$ (fig. 5), ceci se vérifiant sur de nombreux couverts (TAJCHMAN, 1971 ; BOUCHET et PERRIER, 1973).

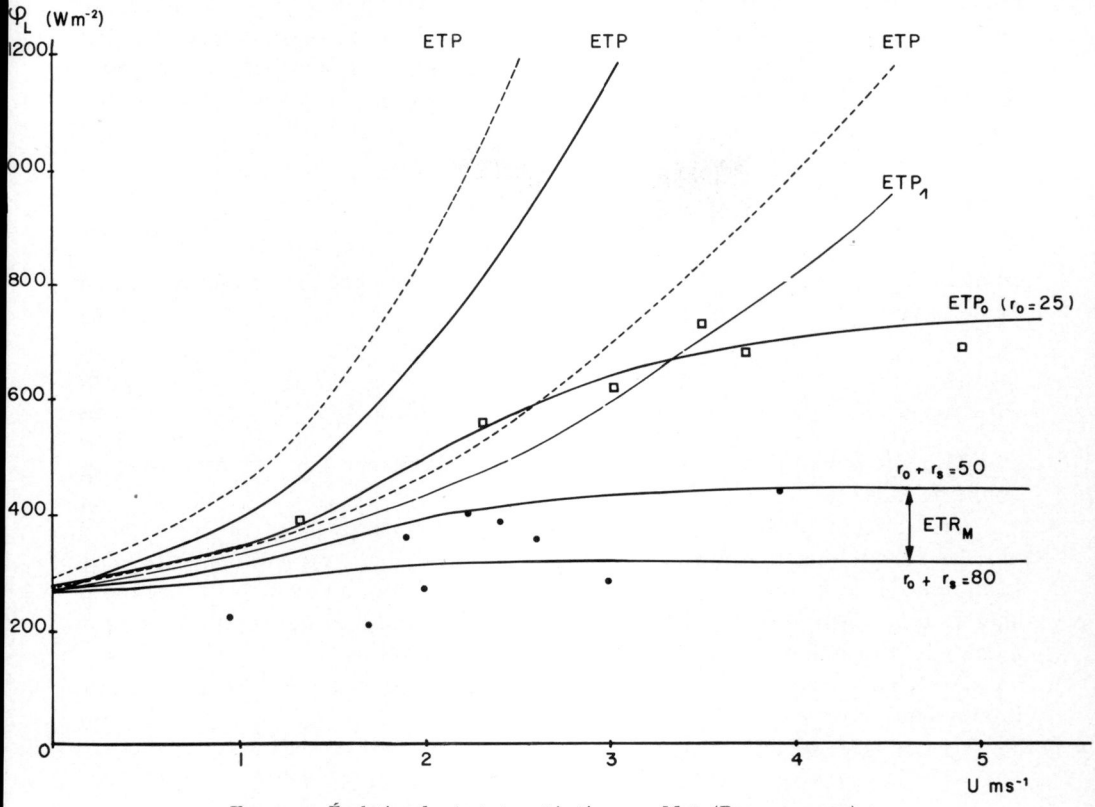


FIG. 5. — *Évolution des évapotranspirations sur Maïs* (PERRIER, 1970)
ETP, évapotranspiration climatique calculée
à partir de la nature de H, T_a, T_r, $Rn \simeq 400$ W m^{-2}

------- ETP ($T_a - T_r \simeq 15$°C, maïs de 2,2 m)
——— ETP ($T_a - T_r \simeq 10$°C, maïs de 2,2 m)
— — — ETP ($T_a - T_r \simeq 5$°C, maïs de 2,2 m)
——— —— ETP_1 ($T_a - T_r \simeq 10$°C, maïs de 0,6 m)
□ ETP_o mesurée sur maïs après pluie ($Rn \simeq 400$ W m^{-2})
($T_a - T_r \simeq 10$°C)
● ETR_M mesurée sur maïs irrigué ($Rn \simeq 400$ W m^{-2}),
($T_a - T_r \simeq 10$°C)

Quant aux valeurs moyennes particulières données au tableau 1 (mesures réalisées avec des déficits hydriques nuls dans le sol durant toute la période de végétation), elles indiquent que la somme de la résistance r_s due à la régulation stomatique et de la résistance du couvert r_o, conduit à une évapotranspiration réelle maximale qui peut être plus faible que celle d'un gazon, dans le cas d'une culture haute, comme le Maïs par exemple ; dans la plupart des cas, ce phénomène serait encore plus marqué pour une forêt (CHARTIER et PERRIER, 1972). En réalité, pour des couverts de même nature (même hauteur, même densité de surface foliaire au sommet de la végétation, soit un coefficient d'échange H identique), plus la densité de surface foliaire est grande dans les parties basses du couvert — c'est-à-dire r_o grand —, plus la réduction de l'évapotranspiration potentielle ETP_o sera grande.

Pour des couverts très différents (hauteur croissante par exemple), on a déjà montré que les valeurs du coefficient d'échange H croissent (relation 3) ainsi que les

résistances globales de structure r_o et de régulation stomatique r_s (SZEICZ *et al.*, 1969). La réduction des valeurs d'ETP_o ou d'ETR_M et d'ETR, pour les couverts en fonction de leur hauteur, dépend donc de l'accroissement relatif de l'un (H) par rapport à l'autre (r_o ou ($r_o + r_s$)). Compte tenu de la relation 6 ou 9 et de la valeur particulière de la résistance critique (cf. chap. II)

$$r_c \sim \frac{LM}{RT}(P' + \gamma)\frac{(T_a - Tr)}{Rn_* + \Phi_c} \qquad (11)$$

cette réduction de l'évapotranspiration a toujours lieu, sauf si, r ($r = r_o$ ou ($r_o + r_s$)) étant inférieur à r_c, l'accroissement vertical de la culture entraîne un accroissement Δr de la résistance r tel que :

$$\Delta r < \frac{\Delta H}{H + \Delta H}\frac{r_c + r}{1 + \dfrac{\gamma + \gamma_r}{\gamma + \gamma_r + P'}Hr} \qquad (12)$$

où ΔH représente l'accroissement du coefficient d'échange pour un accroissement donné de hauteur.

Évidemment, plus la résistance critique est faible (fort rayonnement, air humide), plus les valeurs d'évapotranspiration auront des chances de répondre à cette loi de la diminution en fonction de la hauteur du couvert, ou tout au moins, de s'en rapprocher (évapotranspiration potentielle faiblement croissante et évapotranspiration réelle maximale faiblement décroissante avec la hauteur, tableau 1).

Si cette analyse contribue à une meilleure compréhension des différents facteurs intervenant dans l'évapotranspiration,

— facteurs climatiques intervenant sur ETP,
— architecture de la végétation, r_o, intervenant sur ETP_o,
— résistance stomatique globale, r_s, intervenant sur ETR,

elle n'en demeure pas moins qu'un schéma d'approche.

En effet, la végétation forme un tout complexe, et l'indépendance des termes H, r_o et r_s n'est évidemment pas totale (relation 10, par exemple). Ce n'est qu'un schéma simple qui a réduit au maximum les liens de dépendance entre les divers facteurs introduits.

CONCLUSION

L'analyse présentée qui cherche à ne faire intervenir que des paramètres indépendants, montre, dans tous les cas de couvert, le rôle important de la notion d'évapotranspiration potentielle, introduite depuis longtemps, mais très généralement ramenée par définition à une autre surface (plan d'eau par exemple), ce qui lui faisait perdre une partie de son intérêt. Ici l'évapotranspiration potentielle d'un couvert répond à une définition physique et à la limite réelle (surface mouillée par la pluie ou la rosée) de l'évapotranspiration du couvert considéré, c'est-à-dire avec une tension de vapeur saturante au niveau de toutes les interfaces sol — air, végétation — air qui le composent. Les relations montrent alors que l'évapotranspiration potentielle ETP_o est bien la valeur maximale de l'évapotranspiration pour un couvert donné, et par conséquent, compte tenu de sa structure, fournit, en fonction des conditions climatiques, l'enveloppe des évapotranspirations. Cependant, cette courbe enveloppe

varie beaucoup en fonction de la valeur de la résistance propre du couvert, r_o, ce n'est donc pas comme ETP une valeur liée aux facteurs externes au couvert — facteurs climatiques et facteurs propres à l'état de surface — mais liée à la structure interne du couvert considéré.

L'intérêt est, cependant, de pouvoir, par le biais de ce paramètre interne r_o, jouer sur la valeur de l'évapotranspiration potentielle considérée jusqu'ici comme climatique, donc non modifiable directement par le couvert. Cette notion d'évapotranspiration potentielle climatique qui correspond à la notion théorique introduite (ETP) et non à la valeur vraie ETP_o, peut être très éloignée de la réalité de l'évapotranspiration potentielle ETP_o, surtout pour des couverts à fort développement vertical. C'est évidemment avec de tels couverts, forestiers par exemple, que les modifications les plus spectaculaires peuvent apparaître entre ETP théorique et ETP_o vrai. Les possibilités de variation de la structure et de l'étagement des strates sont considérables, et ont été très naturellement utilisées dans les oasis ou en culture tropicale.

Il n'en reste pas moins que les possibilités d'action sur les diverses cultures agricoles, par la densité et la sélection de variétés de hauteur et de répartition foliaire différentes, sont encore à exploiter sous l'angle hydrique, mais aussi sous l'angle de la photosynthèse. Aux effets hydriques d'économie d'eau et de réduction d'ETP_o peuvent être combinés une meilleure utilisation de la lumière et un meilleur apport convectif de gaz carbonique nécessaire à la photosynthèse.

Reçu pour publication en octobre 1974.

SUMMARY

PHYSICAL STUDY OF EVAPOTRANSPIRATION IN NATURAL CONDITIONS.

III. — ACTUAL AND POTENTIEL EVAPOTRANSPIRATION OF CANOPIES

The previous chapters do not mentioned the case of a developped canopy according height. If we try to apply in this case the previous definition of potential evaporation and relations giving surface temperature and dew point temperature at the surface it is necessary to consider all these values at the top of the canopy (level Z_h) and introduce an arbitrary potentiel evapotranspiration at this level. Potential evapotranspiration of a canopy follows the definition given in chapters one and two but its relation includes a resistance which is essentially a structure resistance of canopy. It is necessary to add a new resistance in function of all stomatal regulations of the canopy in order to obtain actual evapotranspiration. This schematic diagramm of three resistances to describe a canopy give concordance results with variations of evapotranspiration according to climatic factors and canopies.

ZUSAMMENFASSUNG

III. — TATSÄCHLICHE UND POTENTIELLE EVAPOTRANSPIRATION VON PFLANZENDECKEN

In den beiden vorgängigen Kapiteln wurde der Fall der Bedeckung von stark vertikaler Entwicklung nicht erörtert. Wenn man versucht, für diese Art der Bedeckung die gut definierten Begriffe der vorhergehenden Kapitelpotentielle Evapotranspiration, Oberflächentemperatur, und

Temperatur der Benetzung der Oberfläche — ist es notwendig, diese Werte auf dem oberen Niveau Z_h der Bedeckung in Betracht zu ziehen und die fiktive potentielle Evapotranspiration auf diesem Niveau einzuführen. Die potentielle Evapotranspiration der Bedeckung wird also wie vorher definiert, jedoch schaltet sich ein der Struktur der Bedeckung eigener Widerstand ein. Was die tatsächliche Evapotranspiration betrifft, so tritt also ein doppelter Widerstand dazwischen : der struktureigene und der durch die verschiedenen stomatären Regulierungen bedingte. Es scheint sich ein Schema mit drei Widerständen zu ergeben (Luft — Struktur der Bedeckung — stomatäre Regulation) um auf vereinfachte Weise Pflanzendecken zu erfassen. Dieses Schema bestätigt eine gewisse Anzahl von Resultaten, die die je nach Klimafaktoren und verschiedenen Bedeckungen variierende Evapotranspiration betreffen.

РЕЗЮМЕ

Физическое изучение эвапотранспирации в природных условиях. — 3) Реальная и потенциальная эвапотранспирации растительных покровов

А. ПЕРРЬЕ

В двух последних сообщениях не был еще затронут вопрос сильно развитых в вертикальном направлении растительных покровов. При применении к покровам этого типа понятий вытекающих из пред' идущих работ — потенциальная эвапотранспирация, поверхностная температура и температура росы на поверхности — необходимо рассматривать эти величины на более высоком уровне Z_h этого покрова, с интродукцией на этот уровень фиктивной потенциальной эвапотранспирации. Тогда становится возможным, такое-же как и в пред' идущих работах, определение потенциальной эвапотранспирации этого покрова, с участием устойчивости присущей свойственной этому покрову архитектуры. В случае-же определения реальной эвапотранспирации необходимо участие двух устойчивостей : свойственной архитектуре покрова и вызванной различной регуляцией устьиц.

Схема включающая три устойчивости — воздуха, структуры растительного покрова и регуляции устьиц — подтверждает некоторые результаты изменений эвапотранспирации, в зависимости от климатических условий и различий покрова, и может, как кажется, применяться для упрощения операций.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M. C., 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *J. Appl. Ecol.*, **3**, 41-54.

BOUCHET R., PERRIER A., 1973. Bilan d'énergie et évapotranspiration à différentes échelles. In : congr. *Le soleil au Service de l'homme*, UNESCO, Paris, 2-6 juillet 1973, 27 p.

CHARTIER P., PERRIER A., 1972. Structure du feuillage, agent modificateur du microclimat. *C. R. Acad. Agric.*, **58** (15), 1241-1249.

CIONCO R. M., 1965. A mathematical model for air flow in vegetation canopy. *J. Appl. Meteorol.*, **4**, 517-522.

IMPENS I., LEMEUR R., 1969. Extinction of net radiation in different crop canopies. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B, **17**, 403-412.

MILTHORPE F. L., PENMAN H. L., 1967. The diffusive conductivity of the stomata of wheat leaves. *J. Exp. Bot.*, **18**, 56, 423-456.

MONSI M., SAEKI T., 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine Bedentung für die Stoffproduktion. *Japan J. Botany*, **14**, 22-32.

MONTEITH J. L., 1963. Gas exchange in plant communities. In *Environmental control of plant growth*, Academic Press, New York, 95-110.

MONTEITH J. L., 1965. Evaporation and environment. In *The state and movement of water in living organisms*, Symposia of the Soc. for Exp. Biol., XIX, 205-234, University Press, Cambridge.

PENMAN H. L., LONG I. F., 1960. Weather in wheat. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **86**, 16-50.

PHILIP J. R., 1964. Sources and transfer processes in the air layers occupied by vegetation. *J. Appl. Meteorol.*, **3**, 390-395.

PERRIER A., 1967. Approche théorique de la microturbulence et des transferts dans les couverts végétaux en vue de l'analyse de la production végétale. *La Météorologie*, sér. **5** (4), 527-550.

PERRIER A., 1970. Absorption de l'énergie radiative par un couvert végétal ; influence de celui-ci sur l'intensité des flux en présence. Application au calcul de l'évapotranspiration. In : *Rayonnement solaire et hydrométéorologie*, C. R. Séance d'étude, S. F. T., Sect. Energie solaire, A. F. E. D. E. S., 22 oct. 1970, 28 p.

PERRIER A., ARCHER P., BLANCO DE PABLOS A., 1974. Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures : dispositif et mesures. *Ann. agron.*, **25** (5), 697-731.

STERN W. D., DONALD C. M., 1962. Light relationship in grass-clover swards. *Austr. J. Agr. Res.*, **13**, 599-614.

SZEICZ G., ENDRODI G., TAJCHMAN S. J., 1969. Aerodynamic and surface factors in evaporation. *Water Res. Res.*, **5** (2), 380-394.

TAJCHMAN S. J., 1971. Evapotranspiration and energy balances of forest and field. *Water Res. Res.*, **7** (3), 511-523.

TANNER C. B., 1963. Energy relations in plant communities. In : *Environmental control of plant growth*, 141-148, Evans édit., Academic Press, New York-Londres.

THORNTHWAITE C. W., HOLZMAN B., 1942. Measurement of evaporation from land and water surfaces. *U. S. Dept. Agric. Techn. Bull.*, 817.

VAN BAVEL C. H. M., 1967. Changes in canopy resistance to water loss from Alfafa induced by soil water depletion. *Agric. Meteorol.*, **4**, 165-176.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 245-264.

VARIATION ET ESTIMATION DE L'ÉNERGIE D'ORIGINE SOLAIRE REÇUE SUR DES PLANS D'INCLINAISON ET D'AZIMUT VARIABLES (1)

C. VARLET GRANCHER

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, I. N. R. A.,
97170 Petit-Bourg (Guadeloupe)

RÉSUMÉ

Une méthode d'estimation de l'énergie solaire globale et visible reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables est décrite. Il est nécessaire de déterminer ou de mesurer au minimum :

— la position du soleil, facilement calculable d'après la date et le lieu,
— le rayonnement global G_0,
— l'énergie réfléchie E_0 (albédomètre),
— le pourcentage de visible dans E_0 ; ce dernier pouvant être estimé dans le cas d'une culture couvrante à partir de l'indice foliaire (fig. 8.)

A l'occasion de cette étude, on a montré que :

— le rayonnement diffus pouvait être déterminé à partir de G_0 et de la position du soleil,
— le pourcentage de visible dans le rayonnement diffus reçu sur un plan d'inclinaison et d'azimut variables ne variait pratiquement pas avec l'orientation du plan (fig. 4 et 5).

I. — INTRODUCTION

Pour une culture bien développée, couvrant totalement le sol, la captation et la pénétration de l'énergie solaire peuvent être étudiées en mesurant les éclairements des plans horizontaux à différents niveaux, au-dessus (donnée météorologique) et à l'intérieur de la végétation. Cependant dans certains cas : bilan radiatif d'une plante

(1) Cet article s'inscrit, pour la partie qui concerne le Maïs, dans la série « Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs » (CHARTIER *et al.*, 1971).

ou d'un organe isolé, d'un jeune semis, éclairement des feuilles de la couche supérieure d'une culture adulte..., il est nécessaire de connaître la quantité et la qualité de l'énergie solaire (en particulier de la partie utile pour la photosynthèse) reçue sur des plans diversement orientés.

Par rapport à un plan horizontal, une surface inclinée reçoit :

a) des rayons provenant directement du soleil, sous un angle d'incidence différent,

b) une partie du rayonnement diffusé par la voûte du ciel,

c) une partie de l'énergie réfléchie par le sol et la culture environnante.

Connaissant les positions du soleil et du plan, et le rayonnement solaire direct (quantité et qualité), le calcul de *a* est simple : ROBINSON (1966), GARNIER et OHMURA (1968).

LISTE DES SYMBOLES UTILISÉS

1. — *Densités de flux énergétiques*

	Mesurés sur une surface horizontale			Mesurés sur un plan d'inclinaison i et d'azimut θ			Estimés
	Spectre solaire	Spectre visible	Visible sous forme quantique	Spectre solaire	Spectre visible	Visible sous forme quantique	
Rayonnement global	G_0	$G_{0\varphi}$	$G_{0\psi}$	$G_{i\theta}$	$G_{i\theta\varphi}$	$G_{i\theta\psi}$	$G'_{i\theta}$, $G'_{i\theta\varphi}$...
Rayonnement diffus	D_0	$D_{0\varphi}$	$D_{0\psi}$	$D_{i\theta}$	$D_{i\theta\varphi}$	$D_{i\theta\psi}$	$D'_{i\theta}$, $D'_{i\theta\varphi}$...
Composante rayon^t. direct (G_0 — D)	S_0	$S_{0\varphi}$	$S_{0\psi}$	$S_{i\theta}$	$S_{i\theta\varphi}$	$S_{i\theta\psi}$	$S'_{i\theta}$, $S'_{i\theta\varphi}$...
Rayonnement réfléchi par le sol et les cultures	E_0	$E_{0\varphi}$	$E_{0\psi}$	$E_{i\theta}$	$E_{i\theta\varphi}$	$E_{i\theta\psi}$	$E'_{i\theta}$, $E'_{i\theta\varphi}$...
Rayonnement global extraterrestre	$G_e = I_e \sin h$						

2. — *Angles et luminance*

	du Soleil	du Ciel
Hauteur	h	l
Azimut	A_0	A
Angle du soleil avec la normale au plan	β	
Luminance		L_{lA}

La luminance du ciel étant anisotrope, l'éclairement reçu sur une surface inclinée ne peut pas être déduit des mesures faites sur un plan horizontal. Certains auteurs ont donc cherché : soit à relier les variations du rayonnement diffus du ciel reçu sur un plan d'orientation variable, à des paramètres tels que la position du soleil et le trouble atmosphérique (SHARMA et PAL, 1965 ; VALKO, 1970 ; TERJUNG et LOUIE, 1972), soit à établir des lois de répartition de la luminance du ciel dans différentes conditions (MOON et SPENCER, 1942 ; WALSH, 1961 ; C. N. B. E., 1964 ; DOURGNON et GODFERT, 1965 ; KITTLER, 1967 ; DOGNIAUX, 1973). Ces deux méthodes nécessitent des mesures particulières : trouble, luminance d'un point du ciel.... Bien que l'importance énergétique de l'énergie réfléchie par le sol et la culture sur une surface inclinée ne soit pas négligeable (VAN DEVENTER et DOLD, 1966), son évaluation a souvent été omise.

Peu d'études rendent compte de la composition spectrale de l'énergie reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables ; dans la plupart des cas, on suppose que la répartition des luminances est la même, que l'on considère l'énergie solaire totale ou seulement la part utile à la photosynthèse (ANDERSON, 1966).

Cependant, à partir des seules mesures sur un plan horizontal des rayonnements solaires global, diffus, réfléchi, il est possible d'estimer les rayonnements diffusés par le ciel et par le sol sur des surfaces diversement inclinées et orientées, à l'aide de certains modèles de répartition des luminances du ciel ; ces modèles sont utilisés seulement pour donner les variations relatives selon l'orientation du plan ou la position du soleil. Les valeurs ainsi obtenues sont comparées aux mesures faites sur des plans variables. Dans les mêmes conditions, à l'aide des mesures complémentaires de composition spectrale, la comparaison des énergies utiles à la photosynthèse estimées et mesurées a été faite. Enfin, pour des raisons pratiques, on a cherché à réduire le nombre des mesures nécessaires à l'analyse d'une situation.

II. — MÉTHODES ET TECHNIQUES

Les mesures ont été faites au laboratoire de bioclimatologie de La Minière (2° Est, 49° Nord) au-dessus d'un jeune semis de Maïs (*Zea mays* L., hybride I. N. R. A. F7 × EP1) d'indice foliaire variant de 0,3 à 0,5 pendant les mois de juin-juillet 1971 et juin-juillet 1972, pour des journées à ciel clair ou couvert. Des mesures de complément (trouble atmosphérique faible) ont aussi été faites en Guadeloupe (61° 40′ Ouest, 16° 10′ Nord).

Les rayonnements solaires : global G_0, diffus D_0, réfléchis par l'ensemble sol-culture E_0 sont obtenus par des pyranomètres de Moll horizontaux. Le premier donne G_0, le second, muni d'une bande pare-soleil de type Schuepp : D_0, le troisième dirigé vers le bas et toujours placé à 1 mètre au-dessus du couvert végétal : E_0. L'énergie fournie par le rayonnement solaire direct sur un plan horizontal est $S_0 = G_0 - D_0$. La surface réceptrice d'un pyranomètre de Moll monté sur une rotule peut prendre une inclinaison i de 0, 30, 60, 90 degrés et un azimut θ de 0° (sud), 90° (Est), 180° (Nord), 270° (Ouest) ; on obtient ainsi $G_{i\theta}$; on notera que cette mesure est entachée d'une certaine erreur due à la variation du coefficient d'étalonnage avec l'inclinaison de la pile. Un disque pare-soleil permet aussi d'obtenir l'énergie diffuse totale, $D_{i\theta} + E_{i\theta}$. Un système analogue muni d'un écran horizontal tapissé de noir mesure la part du ciel seul : $D_{i\theta}$ pour les mêmes azimuts et pour les mêmes inclinaisons.

Un spectroradiomètre (Isco) pouvant être incliné de 0, 30, 60, 90° et prendre un azimut θ de 0, 90, 180, 270 degrés, donne la composition spectrale (dans la gamme des longueurs d'onde 400-1 550 nanomètres) de l'énergie totale diffuse ($D_{i\theta} + E_{i\theta}$).

2. 1. — *Calcul du rayonnement solaire direct reçu sur un plan incliné* : $S_{i\theta}$

Pour un lieu et une date donnés, les formules astronomiques classiques donnent la hauteur h et l'azimut A_0 du soleil en fonction de l'heure. A partir de h et de A_0, il est possible de calculer l'angle β entre la normale au plan et les rayons solaires : on obtient alors $S_{i\theta}$ en fonction de S_0 (ROBINSON, 1966) par :

$$S_{i\theta} = S_0 \frac{\cos \beta}{\sin h}$$

2. 2. — *Estimations des rayonnements diffus*

2. 21. *Rayonnement diffusé par le ciel* $D'_{i\theta}$.

+ *Par ciel clair*, la luminance L_{lA} du ciel en un point de hauteur l et d'azimut A (par rapport au Sud) est donnée soit par les tables du C. N. B. E. (1964), soit par la formule de DOGNIAUX (1973) pour différentes positions du soleil (hauteur h, azimut A_0) :

$$L_{lA} = \frac{L_{\text{zénithale}}}{0{,}273\,85} \left\{ \frac{(0{,}91 + 10\, e^{-3\gamma} + 0{,}45 \cos^2 \gamma)\ (1 - e^{-0{,}32/\sin l})}{(0{,}91 + 10\, e^{-3(\pi/2-h)} + 0{,}45 \sin^2 h)} \right\}$$

γ = arc cos {sin l sin h + cos l cos h cos (A — A_0)}, h et γ étant exprimés en radian.

L'éclairement fourni par une zone de ciel de hauteur l et d'azimut A sur un plan d'inclinaison i et d'azimut θ est donné par la formule générale :

$$L_{lA} \cos l \{\cos i \sin l + \sin i \cos l \cos (\theta - A)\},$$

l'ensemble de la voûte du ciel fournit un éclairement :

$$\sum_l \sum_A L_{lA} \cos l \{\cos i \sin l + \sin i \cos l \cos (\theta - A)\}\ \Delta A\ \ \Delta l;$$

les limites de sommations sont :

— pour l : 0, $\pi/2$
— pour A : les valeurs A_1 et A_2 telles que
cos i sin l + sin i cos l cos (θ — A) = 0 soit

$$A_1 = \theta - \text{Arc cos } [-\text{tg } l \,/\, \text{tg } i)]$$

Le calcul de $D'_{i\theta}$ (valeur estimée de $D_{i\theta}$) en fonction de D_0 peut s'exprimer

$$D'_{i\theta}/D_0 = \frac{\sum_{l=0}^{l=\pi/2} \sum_{A_2}^{A_1} L_{lA} \cos l \{\cos i \sin l + \sin i \cos l \cos (\theta - A)\} \Delta A\, \Delta l}{\sum_l \sum_A L_{lA} \cos l \sin l\, \Delta A \Delta l}$$

On a calculé ce rapport en faisant les sommations sur des intervalles de $\Delta A = 10^o$ et de $\Delta l = 5^o$ pour des hauteurs du soleil h de 0, 20, 40, 60° et des plans d'inclinaison i = 30, 60, 90° et d'azimut θ = 0, 90°, 180°, 270°.

+ *Par ciel couvert*, la luminance d'un point du ciel est indépendante de son azimut A. Nous considérerons deux lois de répartition de la luminance L de la voûte du ciel selon qu'elle varie ou non avec la hauteur l.

— L = L′ d'après WALSH (1961) ou ANDERSON (1966) : Uniform Overcast Sky (UOC),
— L = L′ (1 + 2 sin l)/3 d'après MOON et SPENCER (1942) ou ANDERSON (1966) : Standard Overcast Sky (SOC),

L′ étant la luminance au zénith.

Nous pouvons donc écrire :

$$\text{— UOC : } D'_{i\theta}/D_0 = \frac{1}{\pi} \sum_{l=0}^{l=\pi/2} \sum_{A_2}^{A_1} \cos l \, (\cos i \sin l + \sin i \cos l \cos (\theta - A)) \, \Delta A \, \Delta l$$

qui devient finalement (DUNCAN *et al.*, 1967) :

$$D'_{i\theta} / D_0 = \cos^2 (i/2)$$

$$\text{— SOC : } D'_{i\theta}/D_0 = \frac{3\pi}{7} \sum_{l=0}^{l=\pi/2} \sum_{A_2}^{A_1} \cos l \, (1 + 2 \sin l) \{ \cos i \sin l + \sin i \cos l \cos (\theta - A) \} \, \Delta A \, \Delta l$$

La luminance ne dépendant pas de l'azimut dans les deux cas ci-dessus, on peut prendre $\theta = 0$ (plan orienté au Sud).

2. 22. *Énergie réfléchie par l'ensemble sol-culture* $E'_{i\theta}$.

Si l'on suppose que la luminance dans l'angle solide sous lequel on voit le sol est constante (isotropie des rayonnements réfléchis), on peut utiliser une démarche analogue à celle d'un ciel couvert UOC et apporter l'énergie $E'_{i\theta}$ réfléchie par le sol et arrivant sur le plan d'inclinaison i et d'azimut θ (normale dirigée vers le haut) à l'énergie E_0 mesurée sur un plan horizontal dont la normale est dirigée vers le bas :

$$E'_{i\theta}/E_0 = 1 - \cos^2 (i/2) \qquad \text{(DUNCAN } \textit{et al.}\text{, 1967)}$$

En fait, nous avons exprimé l'énergie réfléchie par le sol, sur le plan de mesure par rapport au rayonnement diffus reçu sur une surface horizontale :

$$E'_{i\theta}/D_0 = E'_{i\theta} / E_0 \times E_0 / D_0$$

2. 3. — *Énergies utiles pour la photosynthèse*

La sommation des éclairements énergétiques monochromatiques dans l'intervalle de longueurs d'onde 400-700 nanomètres (visible) donne l'énergie utile pour la photosynthèse (PhAR ou PAR en langue anglaise) sur le plan horizontal : $G_{0\varphi}$, $D_{0\varphi}$, $S_{0\varphi}$, $E_{0\varphi}$, ou incliné $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\varphi$.

La photosynthèse étant proportionnelle au nombre de photons, il est possible de convertir ces énergies en einsteins (6,023 · 10^{23} quanta) à l'aide de la relation (GAASTRA, 1968)

1 Watt = 8,37 · 10^{-3} λ microeinsteins (seconde)$^{-1}$.
λ : Longueur d'onde en nm

les énergies utiles mesurées en microeinsteins sont notées : ψ

III. — RÉSULTATS

A partir d'un nombre minimal de mesures effectuées sur un plan horizontal, nous voulons connaître l'énergie totale $G_{i\theta}$ et sa partie utile pour la photosynthèse $G_{i\theta\varphi}$ (ou $G_{i\theta\psi}$) reçue sur une surface d'orientation quelconque.

Pour obtenir $G_{i\theta} = D_{i\theta} + E_{i\theta} + S_{i\theta}$, il faut mesurer ou estimer les énergies :

— diffuse du ciel $D_{i\theta}$ ou $D'_{i\theta}$ (mesure de D_0 et modèle de luminance)

— réfléchie par l'ensemble sol-culture $E_{i\theta}$ ou $E'_{i\theta}$ (mesure de E_0 et modèle de luminance),

et calculer $S_{i\theta}$ (mesure de $S_0 = G_0 - D_0$, et position du soleil). La comparaison entre les valeurs de $D_{i\theta}$ et celles de $D'_{i\theta}$ d'une part, et de $D_{i\theta} + E_{i\theta}$ à celles de $D'_{i\theta} + E'_{i\theta}$

TABLEAU I

Variations du rapport $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ *des énergies reçues sur un plan d'inclinaison* $i = 90^o$ (vertical) *et d'azimut* $\theta = 90^o$ (vers l'Est) $(D_{i\theta} + E_{i\theta})$ *et sur une surface horizontale* (D_0), *par ciel couvert, au cours de la journée du 10 juillet 1972*

Heure T. S. V.	10,55	11,40	13,00	13,25	13,55	14,25	14,55	15,40	16,30	16,55	17,25	17,55	18,25	18,55
$(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$	0,48	0,52	0,47	0,46	0,51	0,45	0,55	0,48	0,51	0,41	0,67	0,52	0,42	0,41

$(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ moyen pour la journée : $0,49 \pm 0,04$ (0,04 étant l'écart-type sur la moyenne).

TABLEAU 2

Variations du rapport moyen $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ *pour différentes positions du soleil et pour un plan d'inclinaison* $i = 90^o$, *par ciel couvert, en fonction de l'azimut de ce plan*
(Valeurs moyennes obtenues sur plusieurs journées)

θ	0°	90°	180°	270°
$(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$	$0,54 \pm 0,06$	$0,51 \pm 0,14$	$0,47 \pm 0,15$	$0,51 \pm 0,15$

$(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ moyen pour toutes les mesures : $0,50 \pm 0,15$.

d'autre part, permet de vérifier la validité des modèles choisis et par conséquent d'estimer $G_{i\theta}$ à partir de : G_0, D_0, E_0 et la position du soleil pour un plan d'inclinaison i et d'azimut θ donnés (§ 3. 1).

La partie utile pour la photosynthèse $G_{i\theta\varphi}$ (ou $G_{i\theta\psi}$) a été obtenue par :

— le calcul de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\varphi$ à partir des mesures de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\lambda$ (§ 3. 21 et 3. 22 *b*)

— le calcul de $S_{i\theta\varphi}$ (mesure de $S_{0\varphi}$ et position du soleil, § 3. 22 *a*).

Nous démontrerons (§ 3. 2) que le pourcentage de rayonnement visible dans le rayonnement global reste le même quelle que soit l'orientation du plan.

Il devient alors possible d'estimer $G_{i\theta\varphi}$ ou de façon analogue $G_{i\theta\psi}$, connaissant $D_{0\varphi}$, $E_{0\varphi}$, $G_{0\varphi}$ ainsi que $D'_{i\theta}$, $E'_{i\theta}$, $S_{i\theta}$ qui sont obtenus à l'aide de E_0, D_0, G_0 (§ 2. 2) et de la position du soleil (heure).

Le nombre de données encore nécessaire est important et limite l'extension de ce mode de calcul à des stations de mesures complexes. Nous montrerons (§ 3. 4) qu'il est possible d'estimer :

— $D_{0\varphi}$, $G_{0\varphi}$ à partir des variations du rapport D_0 / G_0 ; relations établies en zone tropicale et tempérée,

— $E_{0\varphi} / E_0$ à partir de l'indice foliaire f de la culture et de G_0 ; relation établie pour plusieurs cultures,

— D_0 à l'aide de G_0, et du rayonnement solaire extra-terrestre.

L'estimation de l'énergie solaire totale ou utile à la photosynthèse reçue sur des plans diversement orientés (i, θ) peut donc être obtenue à l'aide des données simples : E_0, G_0, f, heure.

3. 1. — *Variations et estimations de l'énergie solaire* : $G_{i\theta}$

3. 11. *Cas d'un ciel couvert.*

Le rapport $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ semble indépendant de la position du soleil (voir tableau 1 pour un plan vertical). Le tableau 2 montre qu'une surface d'inclinaison constante reçoit la même fraction de lumière quels que soient son azimut et l'heure de la journée. Par ciel couvert, $G_{i\theta}/G_0$ ne dépend donc que de i (tabl. 3).

TABLEAU 3

Comparaison des valeurs du rapport des énergies reçues sur un plan incliné et sur une surface horizontale, obtenues par ciel couvert à partir des mesures $(D_i + E_i)/D_0$ *ou d'estimations* $(D'i + E'i)/D_0$, *en fonction de l'inclinaison* i

Inclinaison du plan i	Mesures $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$	Estimations : $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0 \cos^2 i/2$		
		SOC	UOC	$E'_{i\theta} = 0$
90°	0,50 ± 0,15	0,69	0,57	0,50
60°	0,80 ± 0,13	0,72	0,78	0,75
30°	0,98 ± 0,11	0,93	0,94	0,93

TABLEAU 4

Variations de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ *et de* $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$ *par ciel clair en fonction de la position du soleil* (hauteur h, azimut A_0, *et du plan* (inclinaison *i* azimut θ) Versailles, juin-juillet 1971 et 1972, valeurs moyennes

Heure T. S. V.		5 h 40	6 h 55	7 h 55	8 h 55	10 h 00	11 h 30	12 h 30	13 h 40	14 h 55	15 h 55	16 h 55	18 h 10
h		14	26	36	45	55	63	63	56	46	36	26	14
A_0		— 112	— 96	— 86	— 73	— 54	— 18	+ 18	+ 54	+ 73	+ 86	+ 96	+ 112
θ = Nord	*i* 90	129* / *90*⋆		93 / *73*	78 / *67*	64 / *65*	70 / *65*	62 / *65*	62 / *65*	90 / *67*	94 / *73*		109 / *90*
	60	*105*	*106*	94 / *87*	84 / *74*	78 / *68*	73 / *66*	74 / *66*	78 / *68*	90 / *74*	118 / *87*	*106*	118 / *105*
	30	*109*	*109*	*98*	97 / *87*	90 / *82*	83 / *80*	82 / *80*	83 / *82*	101 / *87*	99 / *98*	*109*	105 / *103*
θ = Sud	*90*	*76*	*72*	82 / *82*	89 / *93*	93 / *103*	97 / *108*	102 / *107*	91 / *103*	98 / *93*	96 / *82*	*72*	78 / *76*
	60	*98*	*94*	96 / *98*	96 / *105*	111 / *115*	113 / *119*	110 / *119*	115 / *115*	126 / *106*	117 / *98*	93 / *94*	83 / *98*
	30	*96*	*96*	107 / *103*	102 / *111*	112 / *116*	119 / *117*	110 / *117*	116 / *116*	107 / *111*	102 / *103*	93 / *96*	89 / *96*
θ = Ouest	*90*	*60*	*50*	71 / *50*	67 / *56*	68 / *66*	83 / *76*	113 / *86*	106 / *104*	143 / *125*	160 / *146*	*153*	154 / *193*
	60	*73*	*52*	94 / *50*	62 / *57*	73 / *68*	92 / *81*	104 / *101*	130 / *110*	152 / *135*	198 / *162*	*174*	162 / *154*
	30	*78*	*64*	74 / *62*	70 / *71*	84 / *84*	87 / *94*	107 / *103*	122 / *112*	141 / *132*	146 / *145*	*154*	146 / *136*
θ = Est	*90*	166 / *143*	155 / *153*	158 / *146*	126 / *125*	116 / *104*	77 / *86*	74 / *76*	72 / *66*	77 / *56*	76 / *50*	*50*	68 / *60*
	60	*154*	*174*	167 / *162*	138 / *135*	121 / *110*	90 / *101*	79 / *81*	74 / *68*	68 / *57*	76 / *50*	76 / *52*	67 / *73*
	30	*136*	*154*	148 / *145*	133 / *132*	127 / *112*	99 / *103*	85 / *94*	82 / *84*	66 / *71*	101 / *62*	74 / *64*	89 / *78*

* 129 : mesures,
⋆ *90* : *calcul.*

Nous avons comparé, dans le tableau 3, les rapports $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ mesurés et $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$ calculés à partir des estimations faites en prenant $D'_{i\theta}$ pour un ciel SOC ou UOC (§ 2. 21) et en tenant ou ne tenant pas compte de $E'_{i\theta}/E_0 = \{1 - \cos^2 i/2\}$ (§ 2. 22). Les résultats obtenus en supposant les luminances du ciel (UOC) et du sol constantes, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales ; il faut remarquer la faible contribution du sol (différence entre la 3e et la 5e colonne du tableau 3).

3. 12. *Cas d'un ciel clair.*

Nous avons vu (§ 2. 1) que le calcul de $S_{i\theta}$ nécessite seulement la connaissance de la position du soleil (ou de l'heure) et de $S_0 = G_0 - D_0$.

Le tableau 4 donne les moyennes des rapports $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ par ciel clair et au voisinage du solstice d'été. Les valeurs obtenues dépendent de la hauteur h et de l'azimut A_0 du soleil, de l'inclinaison i et de l'azimut θ du plan. L'effet de h et de A_0 diffère fortement selon θ; peu marqué pour le Nord et le Sud, il est important et de sens contraire pour l'Est et l'Ouest. A cette occasion, on notera l'importance du diffus circumsolaire (rapport plus élevé lorsque la normale au plan est dirigée vers le soleil).

L'estimation de $D_{i\theta}/D_0$ peut être faite avec une bonne précision à l'aide des modèles précédemment décrits : la figure 1 montre que les valeurs de $D'_{i\theta}/D_0$ esti-

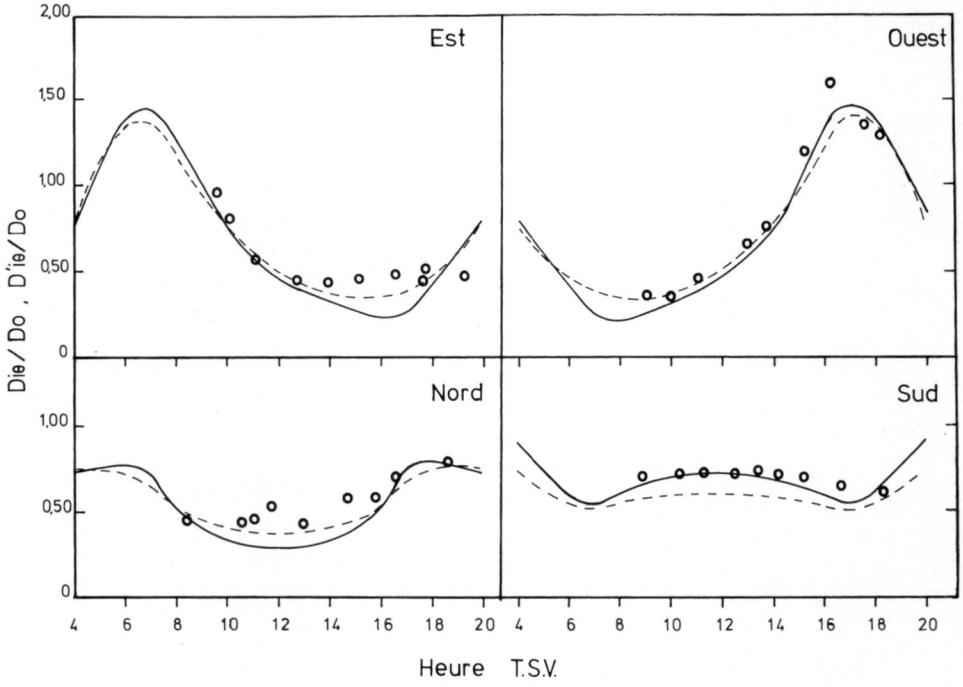


FIG. 1. — *Comparaison des valeurs mesurées de $D_{i\theta}/D_0$* (cercles) *aux estimations de $D'_{i\theta}/D_0$* (traits) *au cours de la journée, par ciel clair, pour une surface d'inclinaison* i = *90° et d'azimut Est, Ouest, Nord, Sud*

Trait plein : luminances du ciel données par le C. N. B. E. (1964) ;
trait pointillé : luminance du ciel calculées d'après la formule de DOGNIAUX (1973)
Versailles, juin-juillet 1971-1972

mées à l'aide des tableaux du C. N. B. E. (1964) ou de la formule de DOGNIAUX (1973) sont très voisines et comparables aux mesures $D_{i\theta}/D_0$. On notera cependant que le calcul théorique sous-estime légèrement les valeurs des rapports. Pour la suite toutefois, nous garderons seulement le premier mode d'estimation.

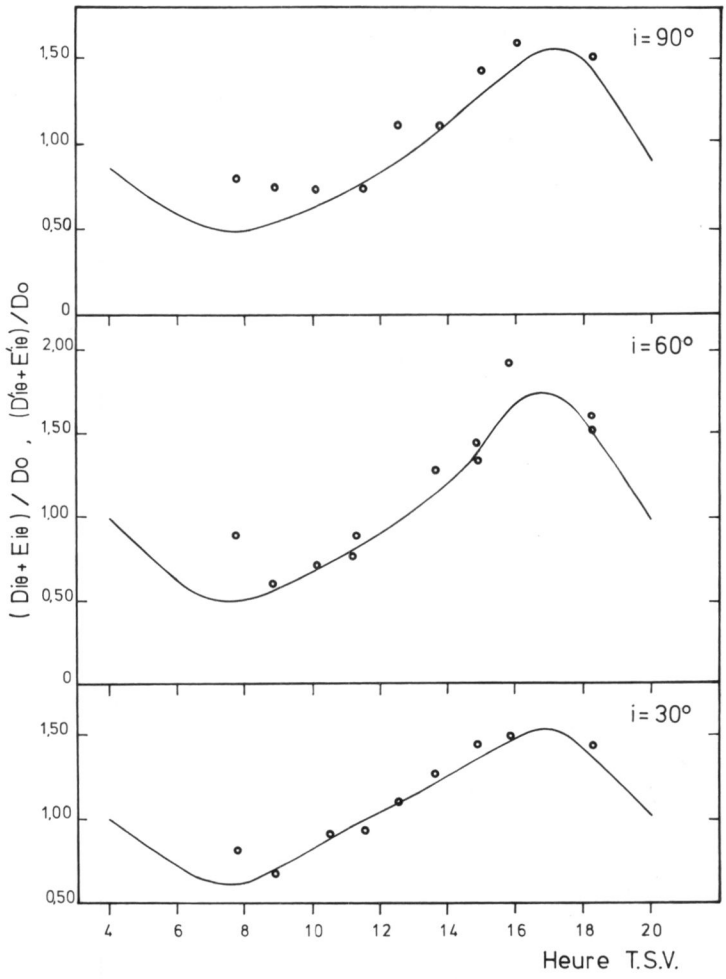


FIG. 2. — *Variations de* $(D_{i\theta} + E_{i\theta})/D_0$ (cercles) *et de* $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$ (traits) *au cours de la journée, par ciel clair pour une surface orientée vers l'Ouest et inclinée à 90, 60 et 30 degrés par rapport à l'horizontale*

Versailles, juin-juillet 1971-1972

Le tableau 4 montre que les valeurs estimées $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$ sont en bon accord avec les valeurs moyennes mesurées; toutefois pour les faibles hauteurs de soleil, les écarts sont plus importants. Ceci peut être expliqué par l'imprécision sur la mesure des énergies de faible niveau. La figure 2 montre ces résultats pour un azimut (270°) et différentes inclinaisons.

3. 2. — *Mesures et estimations de l'énergie utile pour la photosynthèse* $G_{i\theta\varphi}$

3. 21. *Ciel couvert.*

Sur la figure 3, nous avons représenté les variations de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\lambda / D_{0\lambda}$ en fonction de la longueur d'onde λ en regroupant les valeurs correspondant à différentes positions du soleil et à différents azimuts du plan, pour $i = 30°, 60°, 90°$.

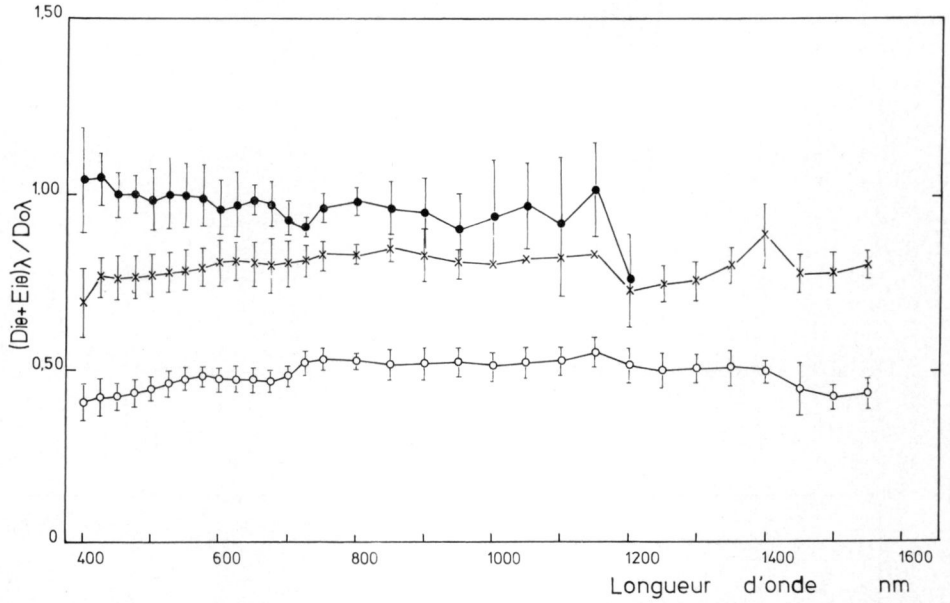


FIG. 3. — *Variations* de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\lambda / D_{0\lambda}$ *par ciel couvert, pour différentes hauteurs du soleil et différents azimuts* (traits verticaux : intervalle de confiance 95 p. 100), *en fonction de la longueur d'onde pour des inclinaisons* i *du plan de 30°* (cercles noirs), *60°* (croix), *90°* (cercles blancs).

La composition spectrale de la lumière reçue sur un plan d'inclinaison i et d'azimut θ, diffère peu de celle reçue par une surface horizontale car le rapport $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\lambda / D_{0\lambda}$ ne varie pas significativement avec la longueur d'onde. Cependant la quantité d'énergie pour chaque longueur d'onde dépend, comme l'énergie totale (§ 3. 11), de l'inclinaison du plan de mesure.

On remarque la faible remontée de la courbe correspondant à l'inclinaison 90° pour $\lambda = 700$ nm due à la part réfléchie par la végétation plus riche en radiations proche infrarouge. Pour une inclinaison donnée, la valeur de $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\lambda / D_{0\lambda}$ pour chaque longueur d'onde étant la même que celle obtenue pour l'énergie totale (§ 3. 11), il est donc possible d'écrire :

$$(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\varphi / D_{0\varphi} = (D'_{i\theta} + E'_{i\theta}) / D_0 \simeq D'_{i\theta} / D_0$$

3. 22. *Ciel clair.*

a) *Rayonnement direct.*

La valeur de $S_{i\theta\varphi}$ se déduit de celle de $S_{0\varphi}$ par la même transformation angulaire que $S_{i\theta}$ de S_0; on a donc :

$$S_{i\theta\varphi} / S_{i\theta} = S_{0\varphi} / S_0$$

b) *Rayonnement diffus.*

Le pourcentage de visible dans le rayonnement diffus reste pratiquement constant lorsque l'on fait varier l'orientation du plan de mesure. Autrement dit les rapports $D_{i\theta\varphi}/D_{0\varphi}$ et $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_{\varphi}/D_{0\varphi}$ varient de la même façon que $D'_{i\theta}/D_0$ et $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$. Ainsi sur les figures 4 et 5, nous pouvons vérifier le bon accord entre les variations journalières de $D_{i\theta\varphi}/D_{0\varphi}$ et $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_{\varphi}/D_{0\varphi}$ et celles de $D'_{i\theta}/D_0$ et $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$, pour une même inclinaison du plan de mesure et des directions différentes ou pour un même azimut et des inclinaisons variables.

Il est donc, comme dans le cas du ciel couvert, possible d'écrire les relations :

$$(D_{i\theta} + E_{i\theta})_{\varphi}/D_{0\varphi} = (D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$$

Les données (mesures sur un plan horizontal et modèles de répartition des luminances) nécessaires pour estimer l'énergie totale $G_{i\theta}$ reçue sur un plan incliné permettent également d'évaluer sa partie utile pour la photosynthèse $G_{i\theta\varphi}$ connaissant $D_{0\varphi}$.

3. 3. — *Mesures et estimations de* $G_{i\theta\psi}$

De façon analogue au paragraphe précédent, on peut écrire, par ciel couvert :

$$(D_{i\theta} + E_{i\theta})_{\psi}/D_{0\psi} \simeq D_{i\theta}/D_0$$

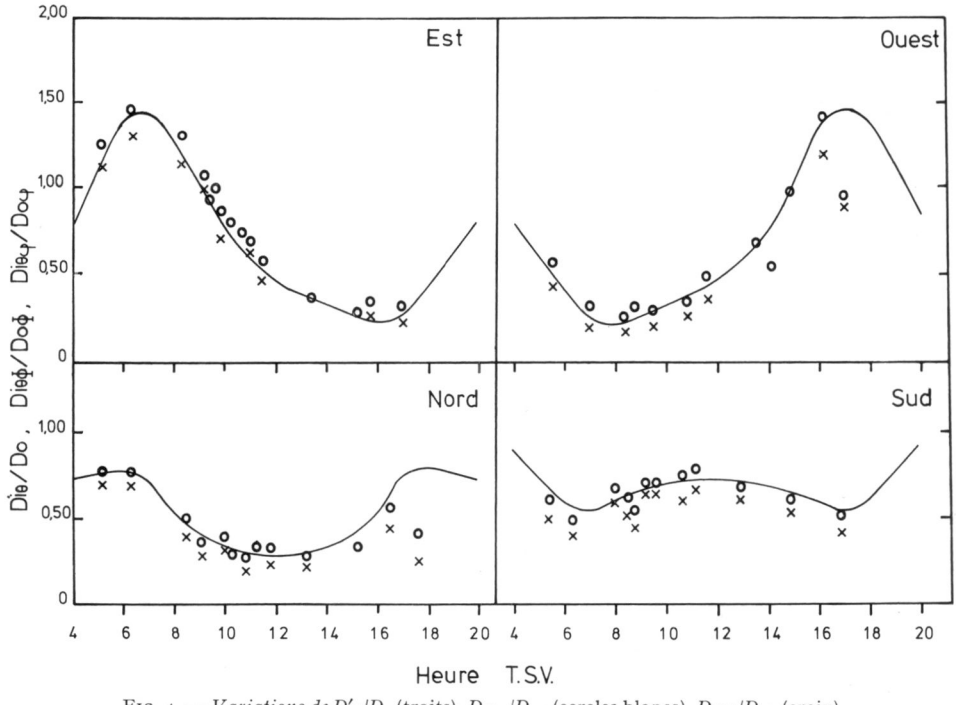


FIG. 4. — *Variations de* $D'_{i\theta}/D_0$ (traits), $D_{i\theta\varphi}/D_{0\varphi}$ (cercles blancs), $D_{i\theta\psi}/D_{0\psi}$ (croix) *au cours de la journée, par ciel clair, pour une surface d'inclinaison* $i = 90^o$ *et d'azimut Est, Ouest, Nord, Sud*

et par ciel clair :

$$S_{i\theta\psi}/S_{i\theta} = S_{0\psi}/S_0$$
$$D_{i\theta\psi}/D_{0\psi} = D'_{i\theta}/D_0$$
$$(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\psi/D_{0\psi} = (D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$$

Les figures 4 et 5 montrent la validité des deux dernières relations.

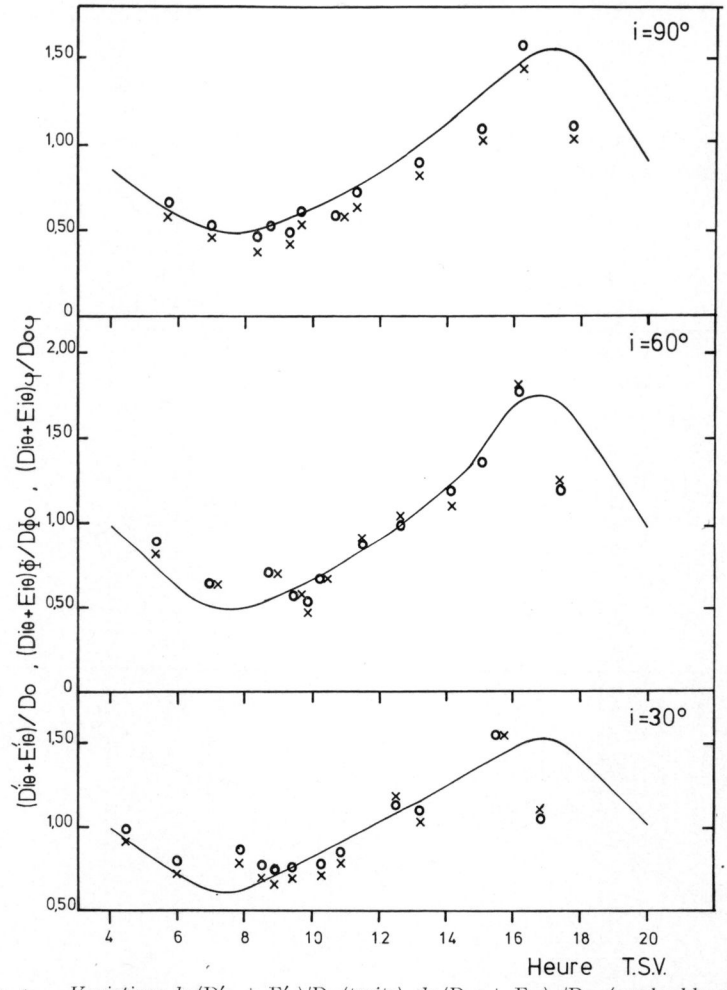


FIG. 5. — *Variations de* $(D'_{i\theta} + E'_{i\theta})/D_0$ (traits), *de* $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\varphi/D_{0\varphi}$ (cercles blancs) *et* $(D_{i\theta} + E_{i\theta})_\psi/D_{0\psi}$ (croix) *au cours de la journée par ciel clair pour une surface d'azimut Ouest et d'inclinaison* i = *90°, 60, 30 degrés*

3. 4. — *Réduction et simplification des mesures nécessaires*

Il ressort de l'étude précédente (§ 3. 22) que l'estimation de $G_{i\theta}$ et $G_{i\theta\varphi}$ (ou $G_{i\theta\psi}$) nécessite :

— la mesure sur un plan horizontal des rayonnements global G_0 et $G_{0\varphi}$, diffus D_0 et $D_{0\varphi}$, réfléchi E_0 et $E_{0\varphi}$,

— la détermination de la position du soleil (heure) et du plan (i, θ).

On peut envisager une réduction du nombre de mesures par des estimations des énergies utiles pour la photosynthèse $D_{0\varphi}$, $S_{0\varphi}$, $G_{0\varphi}$, $E_{0\varphi}$ et du rayonnement diffus D_0.

3. 41. *Estimations de $D_{0\varphi}$, $S_{0\varphi}$, $G_{0\varphi}$ (ou $D_{0\psi}$, $S_{0\psi}$, $G_{0\psi}$).*

L'étude des rapports $(G_{0\varphi}/G_0)$, $(D_{0\varphi}/D_0)$, $(S_{0\varphi}/S_0)$ permet d'estimer le numérateur à partir du dénominateur.

a) *Ciel couvert.*

Il n'y a pas dans ce cas de variations significatives au cours de la journée ; sur l'ensemble des résultats obtenus, nous avons :

$$G_{0\varphi}/G_0 = D_{0\varphi}/D_0 = 0{,}45 \pm 0{,}02$$
$$G_{0\psi}/G_0 = D_{0\psi}/D_0 = 2{,}06 \pm 0{,}06 \ \mu Es^{-2}\ W^{-2}$$

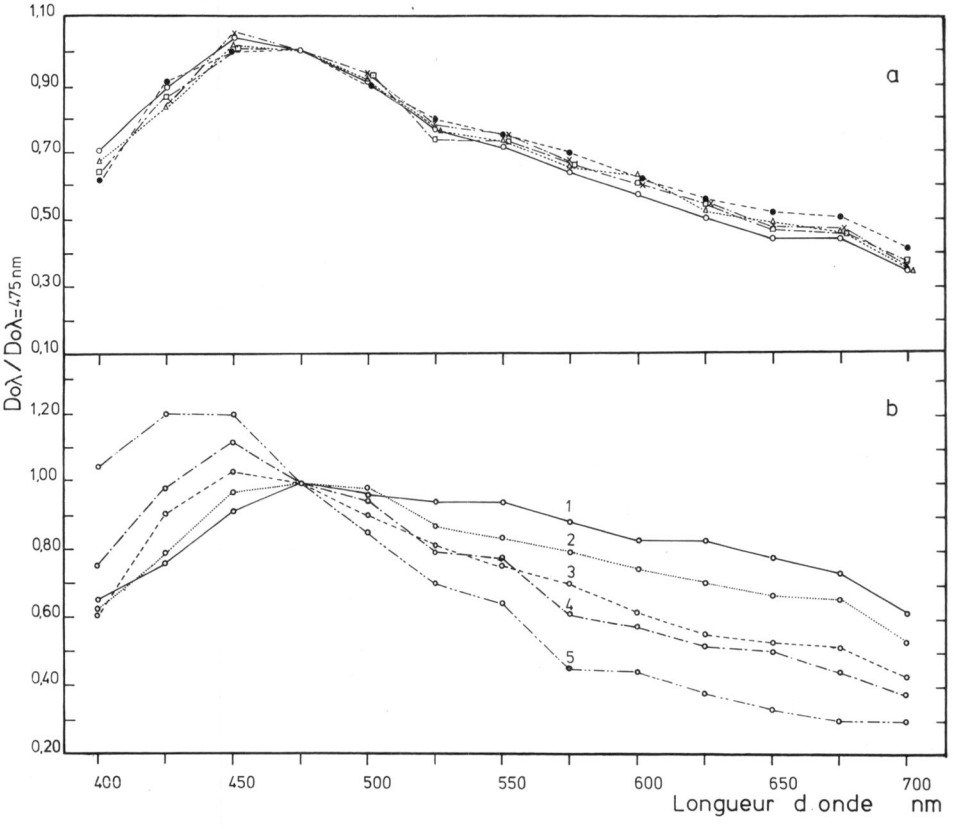


FIG. 6. — *Variations du rapport $D_{0\lambda}/D_{0\lambda'}$ ($\lambda' = 475$ nm) en fonction de la longueur d'onde pour*

— 6 *a*, un rapport D_0/G_0 constant (0,25) et différentes hauteurs du soleil : 24 degrés (points noirs) ; 33° (croix) ; 43° (cercles blancs) ; 55° (triangles blancs) et 64° (carrés blancs) ;

— 6 *b*, une hauteur du soleil constante (25°) et différentes valeurs de D_0/G_0 ; 1,00 (courbe 1) ; 0,45 (courbe 2) ; 0,30 (courbe 3) ; 0,26 (courbe 4) et 0,12 (courbe 5).

b) *Ciel clair.*

L'influence de la hauteur du soleil sur la composition spectrale des rayonnements global ou diffus (fig. 6 *a*) étant négligeable devant l'importance de l'énergie diffuse dans l'énergie totale : D_0/G_0 (fig. 6 *b*), nous avons étudié les variations de $D_{0\varphi}/D_0$, $D_{0\psi}/D_0$, $S_{0\varphi}/S_0$, $S_{0\psi}/S_0$, $G_{0\varphi}/G_0$ et $G_{0\psi}/G_0$ en fonction de ce rapport (fig. 7).

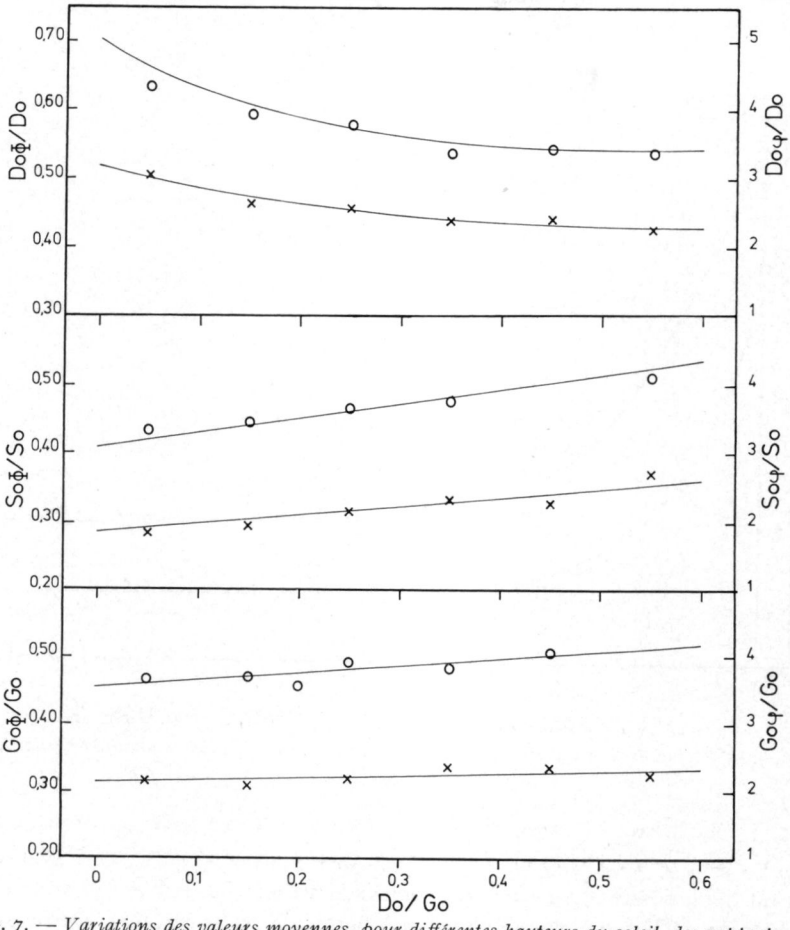


FIG. 7. — *Variations des valeurs moyennes, pour différentes hauteurs du soleil, des rapports :* $D_{0\varphi}/D_0$, $S_{0\varphi}/S_0$, $G_{0\varphi}/G_0$ (cercles blancs) *et* $D_{0\psi}/D_0$, $S_{0\psi}/S_0$, $G_{0\psi}/G_0$ (croix) *en fonction du rapport* D_0/G_0

Lorsque D_0/G_0 diminue, $D_{0\varphi}/D_0$ augmente alors que $S_{0\varphi}/S_0$ décroît légèrement ; il en résulte que la part d'énergie utile à la photosynthèse dans le rayonnement global $G_{0\varphi}/G_0$ varie peu du ciel clair au ciel couvert. On observe la même chose lorsque les énergies sont exprimées en microeinsteins. Il est donc possible d'évaluer

$D_{0\varphi}$, $D_{0\psi}$, $S_{0\varphi}$, $S_{0\psi}$, $G_{0\varphi}$ et $G_{0\psi}$ à partir de G_0 et D_0 (fig. 7).

3. 42. *Estimation de* $E_{0\varphi}$ *(ou* $E_{0\psi}$*).*

Pour un sol nu, le rapport $E_{0\varphi}/E_0$ reste constant quelle que soit l'heure de la journée (VARLET GRANCHER et BONHOMME, 1974). On a montré toutefois qu'il

variait légèrement entre un sol humide et un sol très sec. Pour une même humidité superficielle, l'implantation d'une culture conduit à une diminution de l'énergie visible réfléchie alors que E_0 croît : on a donc une décroissance marquée de $E_{0\varphi}/E_0$ (ou $E_{0\psi}/E_0$) en fonction de l'indice foliaire f de la culture. La variation obtenue pour une culture de Maïs (fig. 8), indépendante de l'heure, est importante jusqu'à une valeur de f voisine de 1,5. Nous avons trouvé des résultats semblables pour des couverts végétaux différents : Canne à sucre, *Vigna sinensis*.

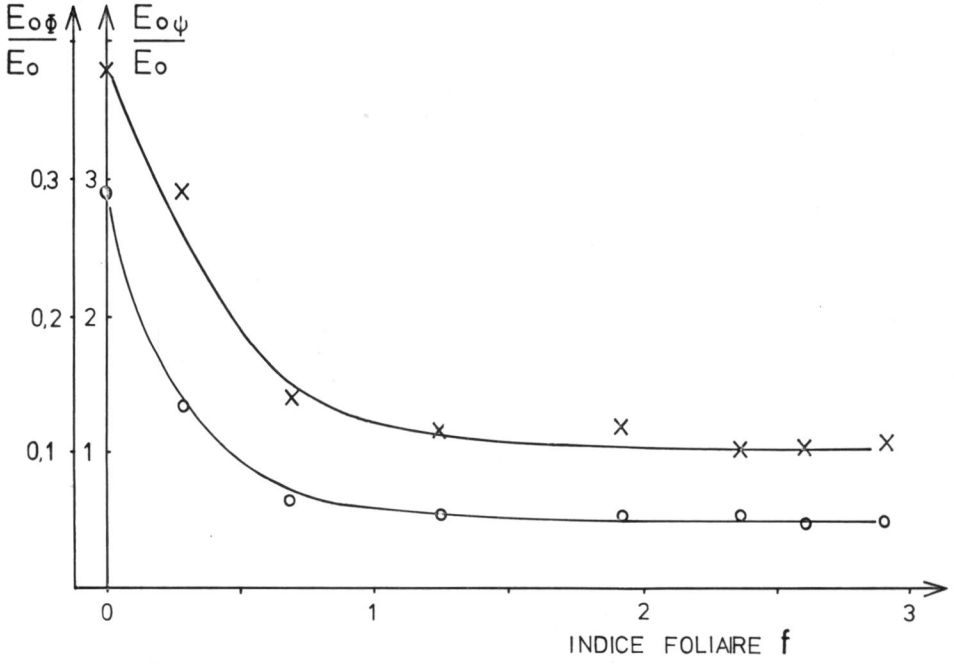


FIG. 8. — *Évolution des rapports $E_{0\varphi}/E_0$ et $E_{0\psi}/E_0$ en fonction de l'indice foliaire de la culture :* f Maïs, Versailles 1971

$E_{0\varphi}/E_0$ varie de 0,1 à 0,4 p. 100 (les croix sur le graphique)
$E_{0\psi}/E_0$ varie de 0,5 à 3 microeinsteins par joule (les ronds sur le graphique)

Il est donc possible, lorsque l'on possède la valeur de l'indice foliaire, de remplacer la mesure de $E_{0\varphi}$ par une évaluation à partir de cette dernière. De plus, par ciel couvert, on peut établir pour une culture la relation entre E_0/G_0 et f, donc estimer E_0 au lieu de le mesurer ; par contre, par ciel clair, des variations journalières se superposant à des variations dans le temps (VARLET GRANCHER et BONHOMME, 1974), cette évaluation n'est pas possible avec une bonne précision.

3. 43. *Estimation de* D_0.

De nombreux auteurs ont cherché à estimer D_0 à partir de l'insolation ou de la nébulosité : DRUMMOND (1956), LIU et JORDAN (1960), HELDAL (1972), KALMA et FLEMING (1972), mais en considérant seulement des valeurs journalières. Les estimations horaires font intervenir des paramètres particuliers (trouble atmosphérique) : SHARMA et PAL (1965), VALKO (1970), TERJUNG et LOUIE (1972), difficiles à mesurer.

Il est possible d'exprimer le rapport horaire D_0/G_0 en fonction du rayonnement solaire extra-terrestre G_e et du rayonnement global incident mesuré G_0 selon la relation :

$$(G_e = I_e \sin h \text{ avec } I_e = 1\,353 \text{ Wm}^{-2}$$
$$D_0/G_0 = a\,(G_e - G_0)/G_e + b$$

La corrélation calculée pour le domaine Duclos (Guadeloupe) sur 887 mesures horaires, faites par ciel clair ($D_0/G_0 < 0{,}75$), pour des valeurs de h supérieures à 25°, entre août et décembre 1968, donne : $a = 1{,}01$; $b = -0{,}03$; $r = 0{,}80$; on a donc pratiquement :

$$D_0/G_0 = 1 - G_0/G_e$$

IV. — CONCLUSION

Les différentes étapes suivies au cours de ce travail peuvent être présentées selon le schéma de la figure 9.

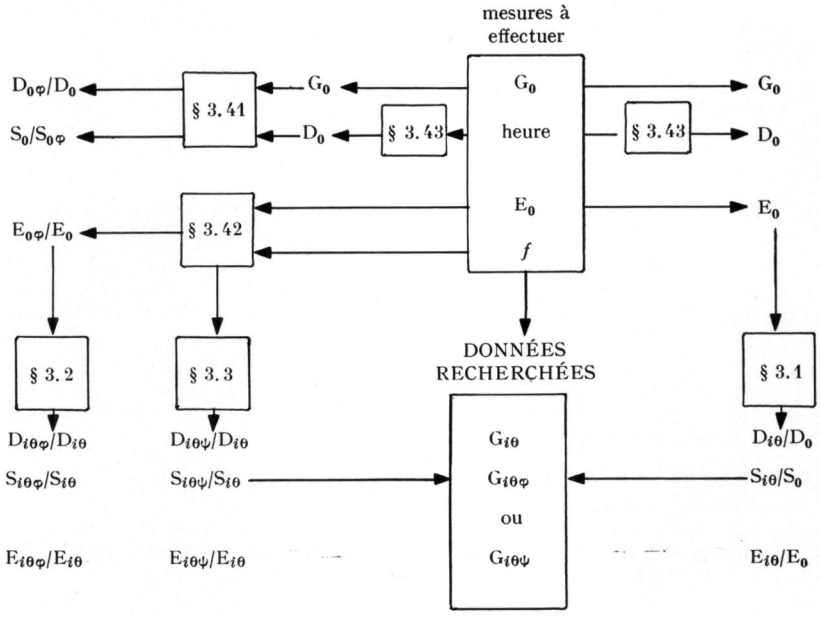


FIG. 9

Le calcul du rayonnement solaire global et du rayonnement visible reçus sur un plan d'azimut et d'inclinaison quelconques peut se faire à partir de la connaissance :

— de la position du soleil (date et lieu),
— du rayonnement global G_0,
— de l'énergie réfléchie E_0,
— du pourcentage de visible dans E_0 ; ce dernier variant avec la quantité de feuillage recouvrant le sol.

On notera tout particulièrement que le pourcentage de visible dans le rayonnement diffus reçu par un plan d'orientation quelconque est pratiquement indépendant de cette orientation.

Ces résultats ont été recherchés pour établir le bilan radiatif et étudier la photosynthèse d'organes végétaux isolés, de jeunes semis... ; cependant ils peuvent être aussi utilisés par les météorologistes pour estimer les rayonnements reçus sur des terrains accidentés, ou par les architectes pour évaluer l'énergie reçue par les constructions ou aussi par les ingénieurs chargés de mettre au point des capteurs artificiels de l'énergie solaire (énergie thermique, photopile...).

Toutefois cette étude reste incomplète car il faudrait tenir compte de la nébulosité réelle et sommer les résultats sur la journée.

Reçu pour publication en mars 1975.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes collègues R. Bonhomme, Ph. Chartier et R. Durand qui m'ont fait bénéficier de leurs conseils lors de la réalisation de cet article.

SUMMARY

VARIATION AND ESTIMATION OF THE SOLAR ENERGY INCIDENT UPON PLANES OF DIFFERENT ORIENTATIONS

A method of estimation of the solar energy, or of the photosynthetic active radiation (PAR) incident upon planes of different orientations is described. The data which have to be measured are :

— the position of the sun,
— the solar radiation incident upon the horizontal plan as measured by a solarimeter, G_0,
— the reflected solar radiation E_0 and an estimation of the reflected PAR from leaf area index measurements for instance.

It has been shown also that :

— the sky diffuse radiation could be estimated from G_0 and the position of the sun,
— the percentage of visible in the diffuse radiation incident upon planes of various orientations is nearly constant and equal to the percentage received upon the horizontal plan.

ZUSAMMENFASSUNG

ABWEICHUNG UND SCHÄTZUNG DER SONNENENERGIE AUF EBENEN IN VERSCHIEDENER NEIGUNG UND HIMMELSRICHTUNG

Eine Methode zur Schätzung der gesamten und sichtbaren Sonnenenergie auf Ebenen in verschiedenen Neigungen und Himmelsrichtungen wird beschrieben. Dazu ist es nötig, mindestens die folgenden Grössen zu bestimmen oder zu messen :

— den Sonnenstand, einfach berechenbar aus Datum und Ort ;
— die Gesamtstrahlung G_0 ;

— die reflektierte Energie E_0 (Albedometer) ;
— der sichtbare Prozentsatz von E_0 ; dies letztere kann im Falle einer Deckkultur mit Hilfe des Blattindexes geschätzt werden (Abb. 8).

Anhand dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass :

— die diffuse Strahlung mit Hilfe von G_0 und des Sonnenstandes bestimmt werden kann ;
— der Prozentsatz der sichtbaren Energie in der diffusen Strahlung, die auf einer Ebene mit variierender Neigung und Azimut aufgefangen wird, sich mit der Orientierung der Ebene praktisch nicht verändert (Abb. 4 und 5).

РЕЗЮМЕ

Изменения и оценка солнечной энергии получаемой на планах под разными углами и при пазличных азимутах.

К. ВАРЛЕ-ГРАНШЕ.

В данном труде описывается метод оценки общей и видимой солнечной энергии получаемой на планах под разными углами и при различных азимутах. При применении этого метода минимальными требованиями являются определение или измерение :

— положения солнца, которое легко рассчитать в зависимости от даты и пункта;

— общего излучения G_0;

— отраженной энергии E_0 (альбедометр);

— видимого процента E_0; в случае растительного покрова его можно рассчитать при помощи листового показателя (рисунок 8).

Изучение это доказало что :

— рассеянное излучение можно определить зная G_0 и положение солнца;

— процент видимой части рассеянного излучения получаемого на плане под углом и при меняющихся азимутах, не изменяется в зависимости от ориентации плана (рис. 4 и 5).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M. C., 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *J. appl. Ecol.*, **3**, 41-54.

CHARTIER P., PERRIER A., VERBRUGGHE M., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. I. Objectifs et présentation du dispositif expérimental de La Minière. *Ann. agron.* **22**, 367-381.

C.N.B.E., 1964. *L'éclairage Naturel et ses applications*. S.I.C., Bruxelles, 50 p.

DOGNIAUX R., 1973. Exposition énergétique par ciel serein des parois orientées et inclinées. Données d'application pour la Belgique. *Inst. Météo. Belgique Ed. Misc.*, Série B, 25 et 26, 153 et 86 pages.

DOURGNON J., GODFERT A., 1965. Représentation algébrique de la répartition des luminances du ciel. *Cahiers du C. S. T. B.*, **77**, 658, 20 pages.

DRUMMOND A. J., 1956. On the measurement of sky radiation. *Arch. Met. Geophys. Bioklim., Série B*, **7**, 413-436.

DUNCAN W. B., LOOMIS R. S., WILLIAMS W. A., HANAU R., 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, **38**, 181-205.

EFIMOVA N. A., 1967. Photosynthetically active radiation over the USSR. In : A. A. NICHIPOROVICH (Editor), *Photosynthesis of Productive systems. IPST*, Jerusalem, 53-59.

GARNIER B. J., OHMURA A., 1968. A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes. *J. of Applied Meteorol.*, **7**, 796-800.

GAASTRA P., 1968. Radiation measurements for investigations of photosynthesis under natural conditions. In : F. E. ECKARDT (Editor), *Functionning of terrestrial ecosystems at the primary production level.* UNESCO, Paris, 467-477.

HELDAL B., 1972. Estimating daily sums of diffuse radiation. *Meldinger fra Norges landsbrukshogskole*, **51**, 1-15.

KALMA J. D., FLEMING P. M., 1972. A note on estimating the Direct and Diffuse Components of global Radiation. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Série B, **20**, 191-205.

KITTLER R., 1967. *Standardization of outdoor conditions for the calculation of day-light factor with clear skies.* Boucentrum International, Rotterdam, 20 pages.

LIU B. Y. H., JORDAN R. C., 1960. The interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. *Solar Energy*, **4**, 1-19.

MOON P., SPENCER D. E., 1942. Proposed standard solar radiation curves for engineering use. *J. Franklin Inst.*, **230**, 538-617.

PUSKAS J., 1973. Évaluation of diffuse solar irradiation of vertical building surfaces. In : Proceedings « *le soleil au Service de l'Homme* » Paris E 121, 1-8.

ROBINSON N., 1966. *Solar radiation.* Elsevier, Amsterdam, 347 p.

SHARMA M. R., PAL R. S., 1965. Total Direct and Diffuse Solar Radiation in the Tropics. *Solar Energy*, **9**, 183-192.

TERJUNG N. H., LOUIE S. S. F., 1972. Potential solar radiation on plant shapes. *Int. J. Biometeor.*, **16**, 25-43.

VALKO P., 1970. Radiation load on buildings of different shape and orientation under various climatic conditions. In : *Building Climatology.* WMO, **225**, TP 142, 87-109.

VAN DEVENTER E. N., DOLD T. B., 1966. Some initial studies on diffuse sky and ground reflected solar radiation on vertical surfaces. In : *Proceedings of the third International Biometerological Congress.* Pergamon, Press, London, 735-742.

VARLET GRANCHER C., 1974. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. V. Évolution de la quantité et de la qualité de la lumière solaire réfléchie par la culture à différents stades. *Ann. agron.*, **25** (6), 797-810.

WALSH J. W. T., 1961. *The science of daylight.* Mac Donald, London, 285 p.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 265-275.

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU POSITIONNEMENT DES AÉRATIONS SUR LES CHAMPS DE TEMPÉRATURE ET DE VITESSE A L'INTÉRIEUR DES TUNNELS DE SEMI-FORÇAGE

A. BAILLE

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Des mesures de température à l'intérieur de tunnels de semi-forçage ont été effectuées en vue de déterminer l'influence du positionnement des aérations sur les champs thermiques et cinématiques internes, et sur les taux de renouvellement d'air. Plusieurs schémas de perforation ont été étudiés. On constate que la disposition en quinconce, comportant des aérations au sommet et des aérations latérales alternées permet d'obtenir :

— une bonne homogénéisation des champs thermiques et l'élimination des pointes extrêmes de température susceptibles d'endommager les cultures ;
— un accroissement des échanges avec l'extérieur (CO_2) par rapport aux autres schémas de perforation, notamment par temps calme.

Ces deux facteurs semblent être les causes principales de la précocité et de l'augmentation de rendement des cultures relevées au cours de divers essais de techniques culturales, sous ces tunnels.

I. — INTRODUCTION

Au cours de divers essais de techniques culturales effectuès en 1971 et 1972 par le Service d'Expérimentation et d'Information (S. E. I.) et la Station de Bioclimatologie d'Avignon-Montfavet, un facteur important dans la précocité et le rendement de certaines cultures protégées sous tunnels à film plastique s'est avéré être le positionnement des aérations (SAMIE et FRUTOS, 1973). Pour préciser ces effets, des essais de technique culturale portant, entre autres facteurs, sur l'étude de l'influence du positionnement et du nombre des aérations ont été mis en place par le

S. E. I. en 1973 et 1974. Parallèlement à ces essais, la Station de Bioclimatologie a entrepris d'étudier les caractéristiques du climat sous petits tunnels, et plus particulièrement, les modifications de la structure des champs thermiques internes. Les buts recherchés dans cette étude microclimatique étaient principalement :

— de reconstituer, à partir de la connaissance des champs thermiques, les mécanismes de convection naturelle ou de convection mixte à l'intérieur des abris, et d'en déduire certaines données, telles que le taux de renouvellement horaire de l'air sous ces petits tunnels.

— de déterminer si des températures préjudiciables au développement et à la croissance des plantes peuvent éventuellement être atteintes pour certains schémas de perforation.

2. — CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

2. 1. — *Tunnels utilisés*

L'étude a été menée sur des tunnels en polyéthylène, non buttés, identiques à ceux utilisés par le S. E. I. dans ses essais de techniques culturales (type tunnel nantais). Pour des raisons de commodité de mesure, ces tunnels ont été installés près du laboratoire de mesures de la Station de Bioclimatologie, sur du gazon de fétuque régulièrement tondu. Les tunnels étaient orientés Nord-Sud, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du vent dominant, le Mistral. Bien que ces conditions ne soient pas exactement celles des esssais de technique culturale du S. E. I., notamment par l'absence de plantes pouvant perturber l'écoulement intérieur ou intercepter le rayonnement et modifier les champs de température, on peut cependant s'attendre à des structures thermiques et cinématiques comparables dans les deux cas. La figure 1 présente le type de tunnel utilisé et ses dimensions.

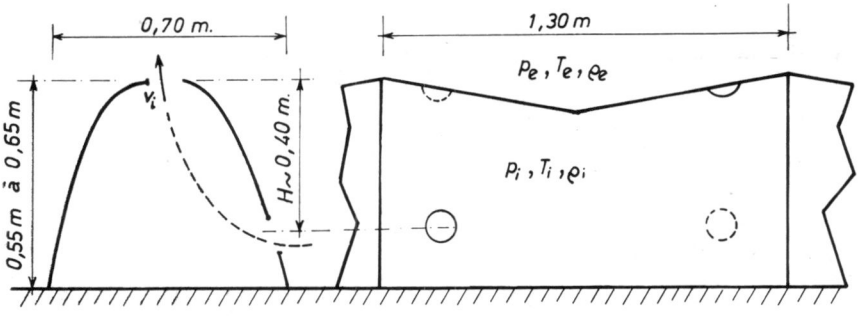


FIG. 1. — *Dimensions d'un compartiment de tunnel*

2. 2. — *Perforations*

Les schémas de perforation étudiés sont présentés sur la figure 2. Ils sont au nombre de quatre :

Schéma n° 1 : deux perforations latérales par compartiment, et sur un seul côté.
Schéma n° 2 : quatre perforations latérales par compartiment (deux de chaque côté).
Schéma n° 3 : deux perforations par compartiment, l'une latérale, l'autre au sommet, placées en quinconce.
Schéma n° 4 : quatre perforations par compartiment, deux latérales situées sur le même côté, et deux au sommet.

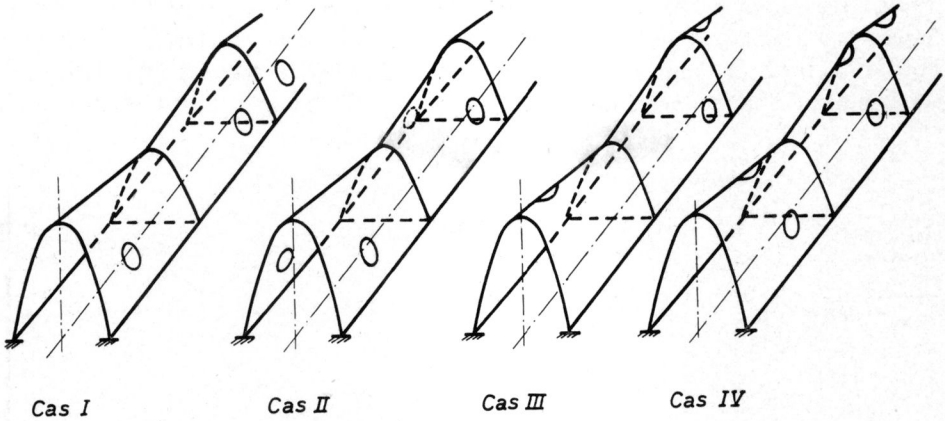


FIG. 2. — *Schémas de perforation*

2. 3. — *Appareillage de mesure*

Les quatre schémas de perforation ont été successivement étudiés par des coupes transversales et longitudinales de température au moyen d'une vingtaine de thermocouples enrobés d'araldite ($\varnothing \simeq 1$ mm), et placés à l'intérieur des tunnels. Un thermocouple de référence était situé à l'extérieur, à 30 cm au-dessus du sol. Les tensions délivrées étaient recueillies sur une acquisition de données et moyennées sur des périodes d'une heure. Ces thermocouples, non ventilés, ont fourni des indices actino-thermiques qui, dans la plupart des cas, sont un meilleur indicateur de la température de surface des feuilles, bourgeons ou fruits que la température de l'air. Ils se prêtent donc mieux que les thermocouples ventilés à l'un des objectifs recherchés dans cette étude, c'est-à-dire déterminer si la plante peut atteindre, en surface, des températures trop élevées pour sa survie. Ces indices ne présentent pas non plus d'inconvénients majeurs pour le calcul des champs de vitesse induits par les écarts de température de l'air : on peut considérer, en première approximation, que les écarts d'indices actino-thermiques sont peu différents des écarts de température de l'air (FOUGEROUZE, 1970).

3. — RÉSULTATS DES MESURES

Pour chaque schéma de perforation sont présentées une coupe transversale et une coupe longitudinale des champs thermiques, choisies parmi les heures les plus chaudes de journées ensoleillées et peu venteuses, et dont les caractéristiques climatiques sont comparables (Rayonnement global RG $\simeq$ 650 cal/cm²/j, vitesse moyenne du vent v à 2 m $\simeq$ 1 m/s). A chaque coupe est associé un schéma décrivant de façon simplifiée la circulation de l'air à l'intérieur du tunnel, déduite des champs de température.

3. 1. — *Champ de température dans le cas du schéma 1* (fig. 3)

Dans ce schéma de perforation, on constate la présence d'une bulle d'air chaud emprisonnée dans la partie supérieure du tunnel, et d'une zone de mélange de l'air, d'importance relativement faible, au niveau des aérations. Les fuites au niveau du sol induisent des zones de basse température près de la surface, mais limitées

aux parties les plus latérales du tunnel. Dans les conditions climatiques précitées, les écarts maximaux d'indice, ΔT, entre l'intérieur du tunnel et l'extérieur ont été de l'ordre de 10°C, et l'indice maximal absolu atteint par le thermocouple situé près du sommet du tunnel a été de 42°C.

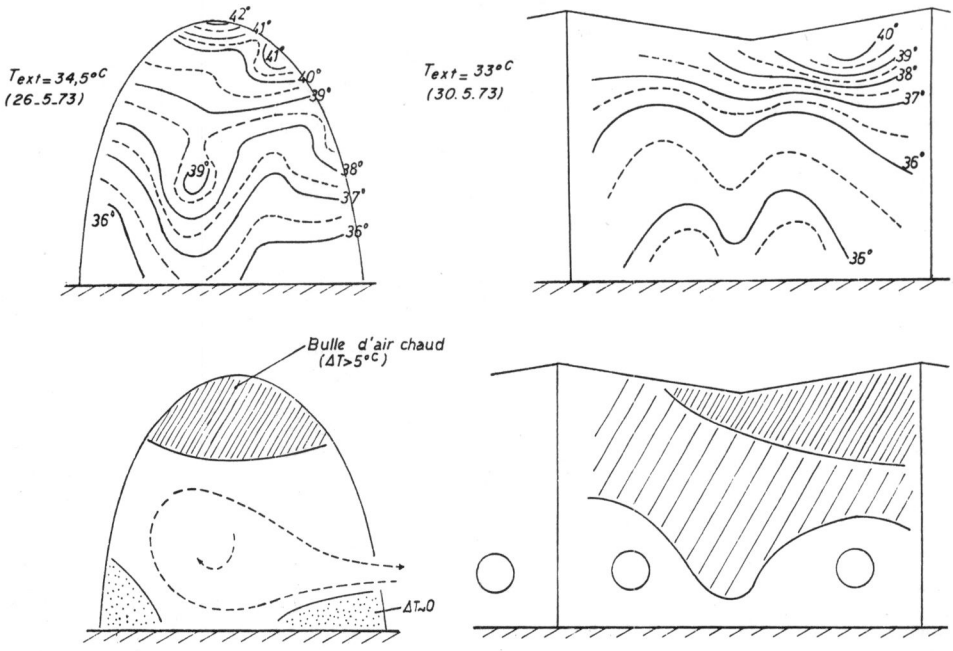


FIG. 3. — *Champs thermiques : Schéma 1*

▨ $\Delta T > 5°C$
▨ $1° < \Delta T < 5°C$
□ $T \simeq$ Text.

3. 2. — *Champ de température dans le cas du schéma 2* (fig. 4)

Comme dans le schéma 1, on remarque, dans la partie supérieure, la présence d'une bulle d'air chaud. La zone d'échange et de circulation de l'air reste limitée à la zone située au niveau des aérations. Il ne semble pas qu'une meilleure homogénéisation de la température soit apportée par l'augmentation de l'intensité d'aération par rapport au cas 1. L'écart maximal ΔT constaté a été de l'ordre de 12°C, et l'indice maximal absolu de 45°C.

3. 3. — *Champ de température dans le cas du schéma 3* (fig. 5)

Les champs thermiques observés aux heures les plus chaudes des journées sont très différents de ceux observés pour les cas 1 et 2. La bulle d'air chaud située au sommet du tunnel n'existe plus, ou, tout au moins, est très réduite par rapport aux cas précédents. Quelques petites zones d'air chaud sont localisées sur les côtés et

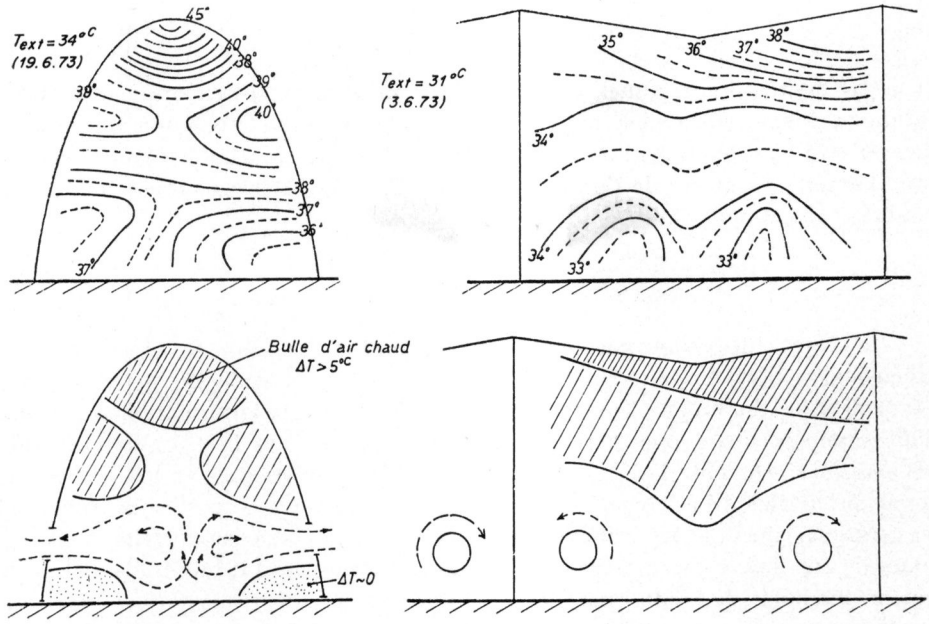


FIG. 4. — *Champs thermiques : Schéma 2*

▨ ΔT > 5°C

▨ 1° < ΔT < 5°C

□ T ≃ Text.

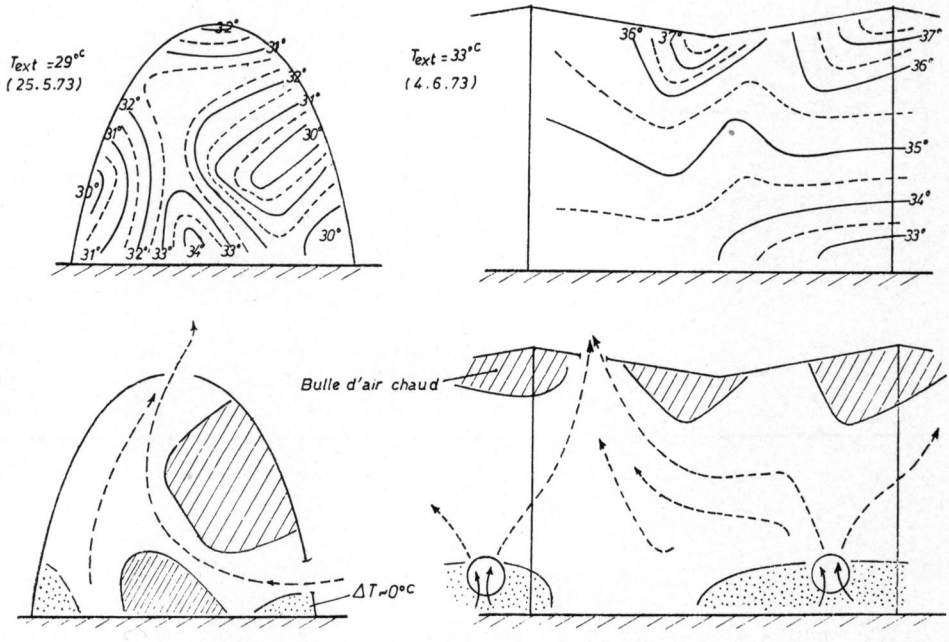


FIG. 5. — *Champs thermiques : Schéma 3*

▨ ΔT > 5°C

▨ 1° < ΔT < 5°C

□ T ≃ Text.

la partie inférieure du tunnel, mais dans l'ensemble, on constate une nette amélioration de l'homogénéisation de la température, due à la circulation plus intense de l'air entre les aérations inférieures et supérieures. Les écarts maximaux observés avec l'extérieur ont été de l'ordre de 6°C à 7°C, et la valeur maximale absolue de l'indice, de 38°C.

3. 4. — *Champ de température dans le cas du schéma 4* (fig. 6)

Ce schéma de perforation, bien que comportant le double des perforations du schéma 3, semble produire une moins bonne homogénéisation de la température. Les contrastes thermiques sont importants, et l'on constate la formation d'une bulle d'air chaud occupant une zone relativement étendue dans l'espace compris entre les aérations. Du fait de la symétrie des aérations supérieures et inférieures, des zones privilégiées d'échange sont créées autour des plans verticaux contenant les aérations, alors que les volumes compris entre ces plans se comportent comme des zones de très faible circulation d'air. L'écart maximal constaté a été de 12°C et la valeur maximale de l'indice de 48°C.

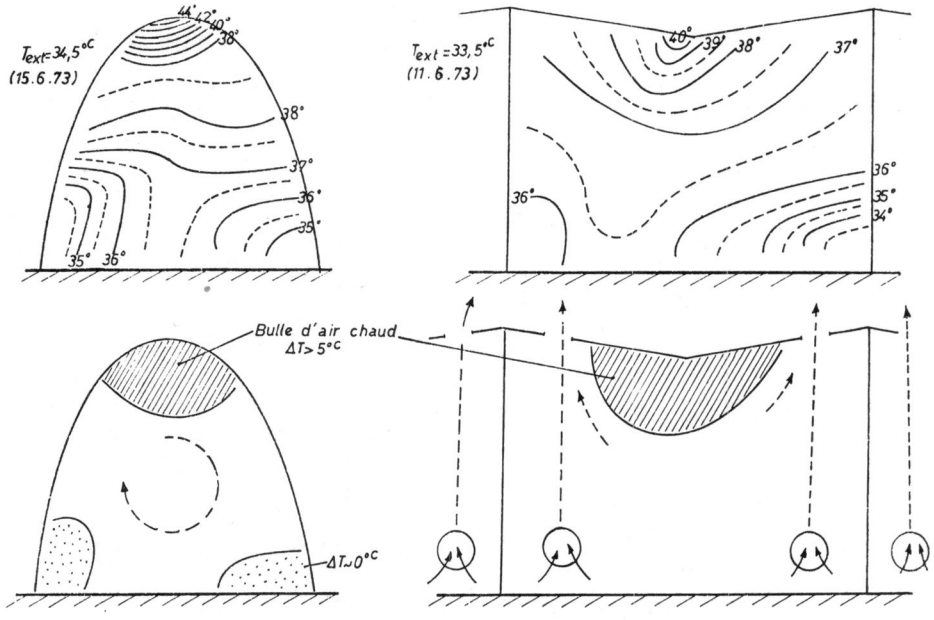


FIG. 6. — *Champs thermiques : Schéma 4*

▨ ΔT > 5°C
▨ 1° < ΔT < 5°C
▭ T ≃ Text.

A partir de la connaissance de ces champs de température, une tentative est faite, dans les paragraphes qui suivent, pour calculer les taux de renouvellement horaires de l'air dans chaque schéma de perforation.

4. — CALCUL DU TAUX DE RENOUVELLEMENT

4. 1. — *Formules de calcul*

Pour le cas des schémas de perforation 3 et 4, où se produit l'effet de « cheminée », il est possible d'appliquer les équations classiques de thermodynamique et de mécanique des fluides. La vitesse de l'air à l'intérieur du tunnel, v_i, est reliée à la différence de pression Δp entre l'intérieur et l'extérieur du tunnel par la relation :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_i \cdot v_i^2 \tag{1}$$

ρ_i étant la masse volumique de l'air à l'intérieur du tunnel.

Cette différence de pression Δp est due à deux causes principales :

1° — à l'écart de température de l'air $\Delta T = T_i - T_e$ entre l'intérieur (indice i) et l'extérieur (indice e), qui induit une différence de masse volumique $\Delta\rho = \rho_e - \rho_i$. La différence de pression due à l'écart de température ΔT vaut donc :

$$(\Delta p)_T = (\rho_e - \rho_i)\ gH \tag{2}$$

H étant la différence de niveau entre les aérations supérieures et inférieures, et g, l'accélération de la pesanteur.

2° — aux forces dynamiques exercées par le vent sur les parois du tunnel (fig. 7) qui induisent une différence de pression $(\Delta p)_D$ que l'on peut exprimer sous la forme :

$$(\Delta p)_D = \frac{1}{2} \rho_e \left[C_1(\Phi) - C_2(\Phi)\right] V^2 \tag{3}$$

Φ étant l'angle d'attaque du vent, $C_1(\Phi)$ et $C_2(\Phi)$ les coefficients de pression respectifs des parois au vent et sous le vent, et V la vitesse du vent (fig. 7).

D'où

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_i v_i^2 = (\Delta p)_T + (\Delta p)_D = (\rho_e - \rho_i)\ gH + \frac{1}{2} \rho_e \left[C_1(\Phi) - C_2(\Phi)\right] V^2 \tag{4}$$

Si on considère l'air comme un gaz parfait, on a, d'après la loi d'état des gaz parfaits :

$$\frac{\rho e}{\rho i} = \frac{T i}{T e} \tag{5}$$

La relation (4) s'écrit alors :

$$v_i \simeq \sqrt{2gH \frac{\Delta T}{T_e} + \left[C_1(\Phi) - C_2(\Phi)\right] V^2 \frac{\rho_e}{\rho_i}}$$

Or, ρ_e/ρ_i est peu différent de l'unité pour des variations de température ΔT faibles. D'où

$$v_i \simeq \sqrt{2gH \frac{\Delta T}{T_e} + \left[C_1(\Phi) - C_2(\Phi)\right] V^2} \tag{6}$$

Dans le cas des schémas 1 et 2, le problème est plus complexe et de traitement difficile au point de vue théorique (Cellules de convection de Benard-Kerman.) On peut néanmoins considérer en première approximation que l'effet de température est négligeable devant l'effet du vent. D'où :

$$v_i \sim \sqrt{C_1(\Phi) - C_2(\Phi)} \cdot V \tag{7}$$

Pour avoir une estimation par vent faible ou nul, on utilisera la formule empirique proposée par OKADA et TAKAKURA (1973) pour l'évaluation du taux de renouvellement dû aux fuites, qui s'écrit :

$$\frac{Q}{Sp} = 0{,}44\ V + 0{,}14\ \sqrt{\Delta T} \tag{8}$$

où Q = débit-heure (m³/h),

Sp = surface des parois de la serre ou du tunnel.

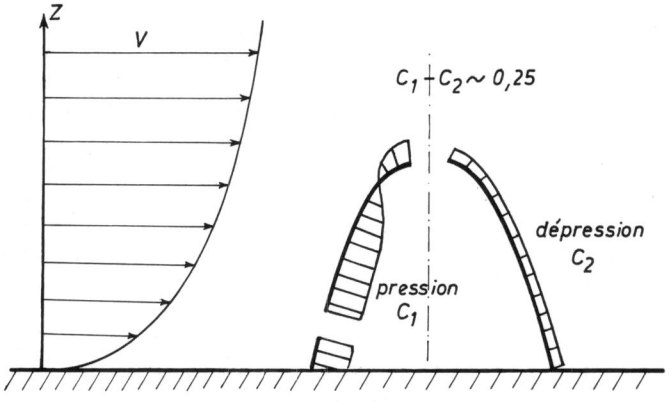


FIG. 7. — *Répartition des coefficients de pression* (Cf. HOERNER)

4. 2. — *Exemples numériques*

4. 21. *Cas général : vent et angle d'attaque non nuls.*

Pour des ouvertures réparties au hasard dans des constructions de forme comparable à celle des tunnels utilisés, HOERNER (1965) donne

$$C_1(\Phi) - C_2(\Phi) \simeq 0{,}25.$$

Si l'on prend

$H = 0{,}40$ m
$V = 1$ m/s (valeur moyennée sur la hauteur du tunnel)
$\Delta T = 4°C$

on obtient, dans le cas des schémas 1 et 2 (relation 7) $v_i \sim 0{,}5$ m/s, et dans le cas des schémas 3 et 4 (relation 6) $v_i \sim 0{,}6$ m/s.

La surface d'une aération étant d'environ 50 à 60 cm², on obtient un débit Q de 8 à 10 m³/h pour les cas 1 et 3, c'est-à-dire des taux de renouvellement N de l'ordre

de 10 à 12, et un débit Q de 16 à 20 m³/h pour les cas 2 et 4, c'est-à-dire des taux de renouvellement horaire N de l'ordre de 20 à 25.

4. 22. *Vent ou angle d'attaque faibles ou nuls.*

Dans le cas des schémas 3 et 4, par vent nul ou angle d'attaque nul, la relation donnant la vitesse v_i devient

$$v_i = \sqrt{2gH \cdot \frac{\Delta T}{T_e}} \tag{9}$$

Pour les mêmes valeurs de H et ΔT que précédemment, on obtient $v_i \simeq 0{,}3$ m/s, d'où :

$Q \simeq 6$ m³/h, $N = 6$ à 8 dans le cas 3
$Q \simeq 12$ m³/h, $N = 12$ à 16 dans le cas 4

Dans le cas des schémas 1 et 2, si l'on utilise la relation empirique (8), on obtient un taux de renouvellement N de l'ordre de 1 à 2.

5. — DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

On peut constater que les structures thermiques sont très dissemblables entre les schémas 1-2, sans aérations au sommet, et les schémas de perforation 3-4, avec aérations au sommet. Pour les deux premiers schémas, les écarts de température avec l'extérieur sont importants par journées ensoleillées ($\Delta T > 10$°C), notamment dans le tiers supérieur du tunnel où reste emprisonnée une bulle d'air chaud. Les indices actino-thermiques peuvent y atteindre des valeurs de l'ordre de 42°C à 45°C, ce qui est supérieur à ce que peuvent supporter certaines plantes.

Pour les schémas de perforation avec aérations latérales et au sommet, il faut distinguer le cas 3 du cas 4. Dans le cas 3, les champs thermiques sont homogènes et les écarts ΔT relativement faibles, ainsi que les maximums atteints. Par contre, dans le cas 4, des zones privilégiées de circulation d'air s'établissent au détriment des zones situées entre les aérations, où l'on observe alors des écarts ΔT et des valeurs d'indice pouvant atteindre les valeurs élevées constatées dans les cas 1 et 2.

En ce qui concerne les taux de renouvellement d'air, les valeurs obtenues par le calcul sont à peu près identiques pour les schémas 1 et 3 ($N \simeq 10$) et 2 et 4 ($N \simeq 20$) lorsqu'il y a du vent. L'influence de la température est alors fortement « tamponnée ». Par contre, en période de calme, les cas 3 et 4 ($N \simeq 6$ à 12) offrent des taux de renouvellement nettement supérieurs à ceux obtenus dans les cas 1 et 2 ($N \simeq 2$). Signalons cependant que les calculs exposés précédemment ne tiennent pas compte des phénomènes induits par les plantes (transpiration, absorption du rayonnement) et de leur rôle d'obstacle (création de pertes de charge) qui peuvent modifier les champs thermiques et les champs de vitesse. Les valeurs données plus haut pour les taux de renouvellement ne sont que des valeurs indicatives, destinées à mettre en évidence les avantages d'un schéma de perforation donné. Ces taux peuvent bien entendu varier dans des proportions non négligeables suivant les conditions climatiques et le type de plante.

Les constatations précédentes montrent les avantages conséquents du schéma de perforation 3 dont on peut recommander la disposition en quinconce des aérations, notamment pour les plantes hautes. Elle permet, grâce à une meilleure circulation de l'air et à un brassage plus intense, de réduire de façon notable les zones où la plante risque d'atteindre des températures critiques, et d'intensifier les échanges intérieurs. Enfin, par périodes de vent nul ou faible, elle permet d'assurer un maximum d'échanges avec l'extérieur, notamment pour le CO_2, ce qui semble être la cause principale de l'augmentation sensible de rendement constatée avec les schémas de perforation au sommet (SAMIE et FRUTOS, 1973).

Reçu pour publication en février 1975.

SUMMARY

STUDY OF THE EFFECT OF AERATION HOLES POSITIONING ON TEMPERATURE AND VELOCITY INSIDE SEMI-FORCING TUNNELS

Temperature measurements inside semi-forcing tunnels were made in view to determine the effect of aeration holes position on the internal thermal and kinematic fields and on the rates of aeration. Several perforation schemes were studied. It is found that a quincunx arrangement, with alternate aeration holes at the top and lateral aeration holes give :

— a good homogeneization of the thermal fields and elimination of extreme peaks of temperature apt to damage crops ;
— an increase in exchanges with the outside (CO_2) in comparison with other perforation schemes, especially by calm weather.

These two factors seem to be the main reasons for earliness and yield increase of crops, noted during various culture technique trials undertaken in these tunnels.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG ÜBER DEN EINFLUSS DER PLAZIERUNG DER BELÜFTUNGEN AUF DIE TEMPERATUR UND LUFTBEWEGUNG IM INNERN VON TUNELLFÖRMIGEN LEICHTGEWÄCHSHÄUSERN (TUNNEL DE SEMI-FORÇAGE)

Temperaturmessungen im Innern von tunnelförmigen Leichtgewächshäusern wurden durchgeführt, um den Einfluss der Lokalisation der Lüftung auf die innere Temperatur und Luftbewegung sowie den Grad der Lufterneuerung zu bestimmen. Verschiedene Durchlöcherungsmuster wurden studiert. Es wird festgestellt, dass die kreuzweise Anordnung, die Belüftung im Giebel und abwechslungsweise auf der Seite zulässt.

— ein gleichmässiges Temperaturfeld und die Ausschaltung von Punkten extremer Temperaturen, die den Kulturen schaden könnten und ;
— ein im Vergleich zu andern Durchlöcherungsmustern besonders bei Windstille erreicht vermehrter Luftaustausch nach aussen (CO_2).

Diese beiden Faktoren scheinen die Hauptgründe für die Frühzeitigkeit und die Erhöhung der Erträge der im Lauf von verschiedenen kulturtechnischen Versuchen in diesen Tunnels herangezogenen Kulturen zu sein.

РЕЗЮМЕ

Изучение влияния расположения аераций на поля температуры и скоростей внутри тунелей для культур полу-ранних овощей.

А. БАЙ.

Измерения температур внутри тунелей для форсированного роста овощей проводились для определения влияния расположения аераций на внутренние термические и кинематические поля и на процент обновления воздуха. Изучалось несколько схем перфораций и было отмечено что расположение в шахматном порядке, включающее поочередно верхушечную и боковые аерации, позволяет достичь :

— хорошей гомогенеизации термических полей и устранения предельных точек температуры, способных повредить культурам.

— усиления обмена с внешней средой (CO_2), по сравнению с другими схемами перфорации, особенно в спокойную погоду.

Эти два фактора являются как-будто главной причиной раннеспелости и увеличения урожайности культур отмеченных в течении многочисленных опытов применения различных приемов агротехники под этими тунелями.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Fougerouze J., 1970. Essais de mesure de température du sol et de l'air sous tunnel plastique à l'aide d'appareillages simples. *Note Technique S. T. E. F. C. E.*, nº 1, I. N. R. A.

Hoerner S. F., 1965. *Résistance à l'avancement dans les fluides*. Gauthier-Villars.

Okada M., Takakura T., 1973. Guide and data for greenhouse air conditioning : heat loss due to air infiltration of heated greenhouse. *J. Agr. Meteor. Japan*, **28**, 223-230.

Samie C., Frutos D., 1973. Influence du positionnement des perforations d'un tunnel de semi-forçage sur le rendement et la précocité d'une culture de tomates. *Pépiniéristes, Hortic., Maraîchers*, **136**, 29-36.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 277-287.

ACCIDENTS VÉGÉTATIFS SUR AGRUMES EN CORSE

MISE EN ÉVIDENCE D'UNE CARENCE EN MOLYBDÈNE PAR UTILISATION DU TEST DE MESURE *IN VIVO* DE L'ACTIVITÉ DE LA NITRATE RÉDUCTASE

Anne Marie BLONDEL et Denise BLANC

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches d'Antibes, I. N. R. A.,
06602 Antibes

RÉSUMÉ

La détermination simultanée de l'activité de la nitrate réductase *in vivo* et de la teneur en nitrates des feuilles, nous a permis d'attribuer à une carence en molybdène les brûlures foliaires observées dans les jeunes vergers de clémentiniers greffés sur *Poncirus* en Corse. Nous avons pu par ailleurs mettre en évidence une relation inverse entre l'activité de la nitrate réductase et la sensibilité aux brûlures des porte-greffe et des variétés qui y sont associées.

INTRODUCTION

La culture des agrumes en Corse s'est développée essentiellement dans la plaine orientale. Cette région comporte principalement des sols bruns et des paléosols rouges plus ou moins évolués sur alluvions anciennes d'origine schisteuse. Ces sols sont caractérisés par une absence de calcaire, un pH acide, un faible pouvoir tampon et une pauvreté en acide phosphorique (CASSIN, 1968).

Depuis 1965, des accidents végétatifs caractérisés par des brûlures de feuilles ont été observés dans certains vergers pendant les premières années de culture (LACOEUILHE *et al.*, 1968). Entre juin et août, les feuilles des rameaux terminaux, généralement non fructifères, jaunissent à l'extrémité apicale, s'enroulent autour de la nervure centrale, puis se nécrosent progressivement et tombent à l'automne.

L'aspect des arbres malades est très caractéristique en raison de la forme en-

roulée que prennent les feuilles. A l'automne, les rameaux sont défoliés et l'on assiste souvent à un départ anticipé de végétation.

Les variétés et les porte-greffe utilisés ont une sensibilité différente vis-à-vis de cet accident. Le clémentinier, qui représente environ 80 p. 100 des plantations, y est particulièrement sensible, surtout lorsqu'il est greffé sur *Poncirus trifoliata*. Or, ce porte-greffe est de plus en plus utilisé en Corse, car il confère aux agrumes, et notamment au clémentinier, une meilleure résistance au froid, une mise à fruit rapide et une amélioration de la qualité des fruits (BLONDEL, 1971). De plus, il est reconnu que les combinaisons *Citrus*/*Poncirus* sont tolérantes à la Tristeza (maladie à virus d'association) alors que les combinaisons traditionnelles *Citrus*/bigaradier y sont très sensibles.

Les brûlures foliaires sont en relation avec l'acidité du sol et tendent à disparaître avec l'apport d'amendements calcaires. L'hypothèse d'une toxicité due à l'aluminium dont la solubilité augmente avec l'acidité du milieu a été envisagée (MOULINIER, 1968), mais l'intervention de cet élément n'a pu être prouvée.

Les analyses foliaires des arbres atteints de brûlures ont montré par rapport aux arbres sains des caractères de jeunesse prolongée : teneurs élevées en N et P et faibles en Ca (LACOEUILHE *et al.*, 1968).

L'apparition de brûlures s'accompagne d'une diminution de l'acidité organique, mais d'une augmentation de l'acidité minérale. La baisse de la proportion d'acides organiques est due en majeure partie à une forte diminution de la teneur en acide malique que ne compense pas l'accroissement parfois constaté des teneurs en acides oxalique et citrique (BOVÉ *et al.*, 1968). La teneur en acides minéraux est élevée : déséquilibre de la balance anions minéraux/cations déjà constaté par LACOEUILHE *et al.*, (1968).

Par ailleurs, JUSTE (1972) a décelé dans les feuilles d'arbres malades une forte accumulation de nitrates, et dans tous les échantillons des feuilles, aussi bien malades que saines, une teneur en molybdène très faible pouvant être considérée comme carentielle d'après les normes utilisées pour les agrumes. On se doit d'ailleurs de signaler qu'associées aux brûlures typiques, on trouve souvent des feuilles portant des taches circulaires analogues à celles que provoque la carence en molybdène décrite par STEWART et LEONARD (1951).

C'est à partir de ces dernières observations, teneurs élevées en nitrates mais faibles en molybdène que nous avons abordé le problème par l'étude de l'activité de la nitrate réductase en relation avec le phénomène de brûlure.

Les accidents végétatifs n'étant observés que sur certaines associations, nous avons testé sur des arbres sains les influences respectives du porte-greffe et du greffon (variétés et clones) sur l'activité de la nitrate réductase et sur la teneur en nitrates des feuilles. Nous avons ensuite, de la même façon, testé les arbres d'une association sensible à cet accident, atteints à différents degrés.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les essais ont été effectués dans des vergers expérimentaux de la Station de Recherche agrumicole de Corse.

1. — *Méthodes analytiques*

— L'activité de la nitrate réductase est mesurée *in vivo* selon la technique de MULDER *et al.* (1959), améliorée par BLONDEL *et al.* (1975).

Des fragments de feuilles sont placés à l'obscurité et à 31°C dans 4 ml d'une solution d'incubation composée de 1 ml de tampon *tris* 0,05M dans HCl 1,5N à pH 7,4, 1 ml de tween 80 à 2 p. 100 et 2 ml de KNO_3 0,5M.

L'activité de la nitrate réductase est mesurée par la quantité de NO_2 formée, exprimée en µg par g de matière fraîche et par heure. Les nitrites sont déterminés par la méthode colorimétrique de SNELL et SNELL (1949) (sulfanilamide en solution à 1 p. 100 dans HCl 1,5N et chlorhydrate de N 1-naphtyl éthylène diamine en solution aqueuse à 0,02 p. 100).

— Les teneurs en nitrates du matériel végétal sont déterminées par ionométrie (MAZOYER, 1972) sur l'extrait aqueux de la poudre sèche des feuilles.

2. — *Échantillonnage des feuilles*

Sur agrumes, le problème du prélèvement d'un matériel homogène et représentatif de l'ensemble de l'arbre est complexe et a donné lieu à de nombreuses publications (DEL-BRASSINE, 1955 ; MARTIN-PREVEL *et al.*, 1965 et 1966). Lorsque l'on veut mesurer l'activité de la nitrate réductase, les prélèvements de matériel frais sont très faibles (250-300 mg) et l'échantillonnage d'autant plus délicat.

Nous avons, pour nos essais, prélevé des feuilles de taille moyenne orientées au Sud sur des rameaux de printemps fructifères ou non fructifères (selon l'âge des arbres), à environ 1 m à 1,5 m de hauteur et à l'extérieur de l'arbre. Pour chaque mesure de l'activité de la nitrate réductase, nous avons utilisé les limbes de deux feuilles découpés en carrés de 5 × 5 mm de côté. Nous avons effectué 2 ou 3 répétitions pour chaque arbre. Les teneurs en NO_3 ont été déterminées sur des feuilles prélevées dans les mêmes conditions.

L'activité de la nitrate réductase peut varier considérablement en fonction des facteurs climatiques externes : lumière, température, humidité. Pour limiter les effets de ces facteurs, nous avons effectué les tests toujours à la même heure et dans quelques cas, nous avons mesuré l'activité 2 jours consécutifs.

Les feuilles une fois prélevées doivent être rapidement analysées, car l'activité de la nitrate réductase diminue très rapidement dans le temps. C'est pourquoi les feuilles détachées de l'arbre sont immédiatement placées dans un sac en matière plastique et conservées dans une glacière pendant leur transport au laboratoire où elles sont lavées, découpées, pesées, puis mises à incuber le plus rapidement possible (moins d'une heure après le prélèvement sur l'arbre).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. — *Étude sur arbres sains : influence respective du porte-greffe et du greffon sur l'activité de la nitrate réductase et la teneur en nitrates des feuilles* (feuilles saines)

Nous avons constaté que les variétés étaient plus ou moins sensibles à l'accident observé, et que le porte-greffe semble jouer un rôle très important vis-à-vis des brûlures. Aussi avons-nous commencé notre étude par des contrôles systématiques sur différentes associations. Ces mesures ont porté uniquement sur des arbres sains, ayant déjà dépassé le stade de grande sensibilité aux brûlures (arbres de plus de 4 ans) ou sur des arbres indemnes de brûlures parmi d'autres plus ou moins atteints.

1. *Comparaison de différentes variétés sur deux porte-greffe.*

Le clémentinier est de loin la variété la plus sensible à l'accident végétatif observé. Mais des symptômes ont été observés également sur mandarinier Wilking et parfois sur bigaradier et oranger.

Nous avons mesuré l'activité de la nitrate réductase et les teneurs en NO_3 des feuilles de rameaux fructifères de plusieurs variétés greffées sur *Poncirus* ou sur Bigaradier (âgés de 9 ans) ne montrant pas ou ne montrant plus de symptômes de brûlures (tabl. 1).

TABLEAU I

Comparaison de différentes variétés sur 2 porte-greffe
(arbres sains)

Variété		Porte-greffe			
		Activité de la nitrate réductase (1) (μg NO_2 formés par g de matière fraîche et par heure)		Teneurs en $N(NO_3)$ en p.p.m. de matière sèche	
		Bigaradier	*Poncirus*	Bigaradier	*Poncirus*
Citronnier Euréka	(1) (2)	21,3 ± 0,7	17,6 ± 0,5	125	145
Oranger Hamlin	(1)	17,4 ± 0,4	15,3 ± 0,3	187	225
	(2)	20,3 ± 0	12,6 ± 0,2	162	212
Clémentinier	(1)	25,1 ± 0,4	14,9 ± 2,2	175	425
	(2)	31,5 ± 4,8	20,8 ± 0,5	350	375
Mandarinier Dancy	(1)	19,2 ± 0,7		125	
	(2)	20,8 ± 0,5	28,8 ± 1,1	130	135

(1) Activité de la nitrate réductase : chaque chiffre représente la moyenne de 2 ou 3 répétitions suivie de la moyenne des écarts à la moyenne.
(2) Expérience réalisée pendant 2 jours consécutifs.

Le porte-greffe semble avoir un rôle prépondérant : le *Poncirus* confère en général à l'association une activité de la nitrate réductase plus faible et une teneur en NO_3 plus élevée que le bigaradier. Seul le mandarinier Dancy fait exception à la règle.

Cependant, il est à signaler que le clémentinier est particulièrement sensible au porte-greffe : l'activité de la nitrate réductase est maximale sur bigaradier et minimale sur *Poncirus* (par rapport aux autres variétés testées).

En ce qui concerne la teneur en NO_3 des feuilles, on peut noter que le clémentinier est la variété qui en contient le plus, surtout lorsqu'il est greffé sur *Poncirus*.

2. *Comparaison de deux variétés sur différents porte-greffe.*

Nous avons testé de la même façon deux variétés : le clémentinier SRA 63 sensible aux brûlures et l'oranger Hamlin peu sensible, en association avec 4 porte-greffe différents (arbres de 6 ans).

Les résultats figurent dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Comparaison des deux variétés sur différents porte-greffe
(arbres sains)

Porte-greffe		Variété					
		Activité de la nitrate réductase (μg NO_2 formés par g de matière fraîche et par heure)			Teneur en $N(NO_3)$ en p.p.m. de matière sèche		
		Clémentinier SRA 63	Oranger Hamlin	Moyenne	Clémentinier SRA 63	Oranger Hamlin	Moyenne
Bigaradier	(1)	21,2 ± 0,5	26,6 ± 1,0	27,0	230	170	241,3
	(2)	33,0 ± 0,0	27,2 ± 0,5		290	275	
Poncirus	(1)	25,6 ± 0,0	13,3 ± 0,5	19,9	412	412	421,5
	(2)	20,3 ± 1,0	20,3 ± 1,1		362	500	
Citrange	(1)	20,7 ± 0,0	20,7 ± 1,0	23,8	210	212	252,3
Troyer	(2)	26,1 ± 1,6	27,8 ± 4,3		362	225	
Mandarinier	(1)	33,0 ± 0,5	33,4 ± 1,0	41,0	190	200	241,0
Cléopâtre	(2)	47,5 ± 1,5	44,4 ± 1,6		362	212	

L'activité varie beaucoup plus en fonction des porte-greffe que des variétés considérées. Elle diminue quand on passe du mandarinier Cléopâtre au bigaradier, au Citrange Troyer, puis au *Poncirus* ; quant aux teneurs en NO_3, elles varient en sens inverse de l'activité.

En ce qui concerne le comportement particulier du mandarinier Cléopâtre dans cet essai, on doit signaler qu'au moment de la mesure, il conférait aux variétés associées une végétation importante et une faible productivité, ce qui peut expliquer la forte activité de la nitrate réductase constatée.

Le *Poncirus* confère aux variétés, comme nous l'avons vu précédemment, une activité de la nitrate réductase plus faible et un taux de NO_3 plus élevé.

3. *Comparaison de deux clones d'une même variété* (Satsuma) *de sensibilité différente, sur deux porte-greffe.*

Dans un jeune verger (arbres d'un an) de Satsuma greffés sur *Poncirus* ou Citrange Troyer, comportant 16 clones ayant un comportement différent d'après les observations de brûlures faites sur le terrain, nous avons testé 2 clones, l'un très sensible (n° 5), l'autre très peu sensible (n° 8). Les déterminations ont été effectuées sur feuilles de rameaux de printemps non fructifères (tabl. 3).

Le clone très sensible a une activité de la nitrate réductase plus faible sur les deux porte-greffe et une teneur en NO_3 plus élevée que le clone peu sensible.

TABLEAU 3

Comparaison de 2 clones de Satsuma sur 2 porte-greffe
(arbres sains)

Clone	Porte-greffe			
	Activité de la nitrate réductase (µg NO_2 par g de matière fraîche et par heure)		Teneur en $N(NO)_3$ en p.p.m. de MS	
	Poncirus	Citrange	*Poncirus*	Citrange
8 peu sensible	12,0 ± 0,8	5,9 ± 0,5	100	80
5 très sensible	2,1 ± 0	1,1 ± 0	175	112

De ces trois essais, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Le *Poncirus* confère aux variétés qui lui sont associées, une activité de la nitrate réductase en général plus faible et un taux de NO_3 plus élevé par rapport aux autres porte-greffe.

Un clone sensible aux brûlures a une activité de la nitrate réductase plus faible et un taux de NO_3 plus élevé.

II. — *Étude sur arbres malades : influence de l'état de brûlure de l'arbre* (clémentinier/*Poncirus*) *sur l'activité de la nitrate réductase et la teneur en nitrates des feuilles*
(feuilles apparemment saines et feuilles malades)

JUSTE (1972) a décelé une accumulation de NO_3 très importante chez les arbres malades, sur 80 échantillons prélevés dans différents vergers où des brûlures ont été constatées. Sur les arbres malades, 3 types de feuilles ont été prélevés : feuilles saines, feuilles brûlées et feuilles tachées (tache circulaire), dont l'auteur a pu comparer les teneurs en NO_3 avec celles de feuilles d'arbres sains voisins, situés dans les mêmes vergers (tabl. 4).

TABLEAU 4

Teneurs en N (NO_3) *en p.p.m. de la matière sèche, des feuilles d'arbres sains et malades* (JUSTE, 1972)
(entre parenthèses : nombre d'échantillons analysés)

Arbres sains	Arbres malades		
Feuilles saines	Feuilles saines	Feuilles tachées	Feuilles brûlées
152 (34)	638 (26)	1 062 (8)	2 552 (12)

Ces chiffres ne sont que des moyennes, mais, dans certains cas extrêmes, jusqu'à 5000 p.p.m. de $N(NO_3)$ ont été décelées dans les feuilles brûlées. L'accumulation n'est pas une conséquence de l'état brûlé puisque les feuilles saines d'arbres malades en contiennent déjà une quantité assez importante.

Un code (de 0 à 5) nous a permis de noter les arbres en fonction de leur état de brûlure croissant. Nous avons pu ainsi mesurer sur des arbres âgés de 3 ans, plus ou moins atteints de brûlures, l'activité de la nitrate réductase et les teneurs en NO_3 de feuilles saines, les feuilles brûlées ayant une activité très faible ou nulle. L'activité est assez élevée sur arbre sain, mais diminue progressivement avec l'intensité des brûlures des arbres. Quant aux teneurs en NO_3, elles augmentent rapidement pour être très élevées lorsque les arbres sont fortement brûlés (fig. 1). Ces observations

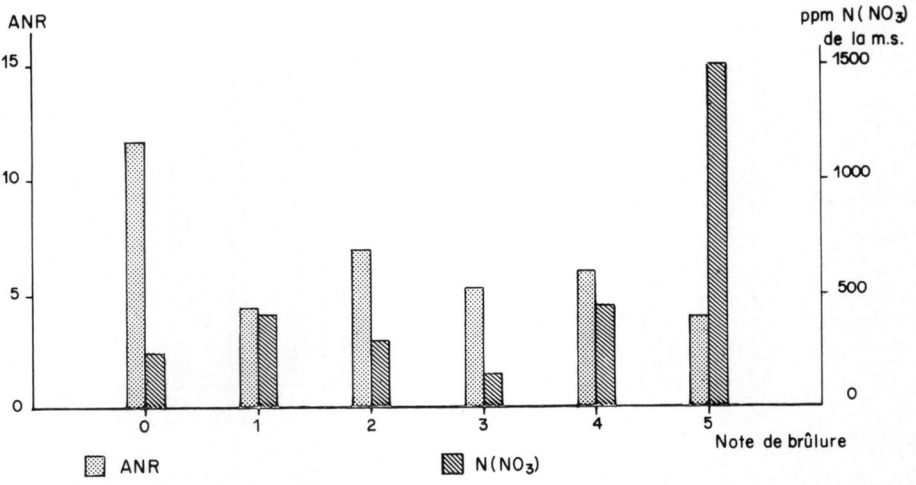


FIG. 1. — *Relation entre l'état de brûlure de l'arbre, l'ANR et la teneur en N* (NO_3)

ont été confirmées lors d'un deuxième essai effectué quelques jours après le premier : les teneurs en NO_3 augmentent progressivement avec l'état de brûlure croissant des arbres, sans augmentation parallèle de l'activité. Or, en général, une augmentation des teneurs en NO_3 s'accompagne d'une augmentation de l'activité de la nitrate réductase (BLONDEL et BLANC, 1974) ; nous ne retrouverons pas ici la corrélation positive attendue et pouvons donc penser qu'un facteur limitant est en jeu ; il pourrait s'agir du molybdène. En effet, le molybdène est le constituant métallique de la nitrate réductase (NICHOLAS et NASON, 1955) et une carence en molybdène se manifeste dans la plante par une accumulation de nitrates. On sait d'autre part qu'en sols acides, le molybdène est très mal assimilé.

III. — *Essai de pulvérisation de molybdène sur arbres malades*

MULDER *et al.*, (1959), et plus récemment SHAKED et BAR AKIVA (1967), sur feuilles de *Citrus* ont déjà utilisé la mesure de l'activité de la nitrate réductase pour détecter des carences en molybdène. Nous avons repris cette technique pour vérifier notre hypothèse.

Nous avons effectué des pulvérisations de molybdène à la dose de 0,1 g de

molybdate d'ammonium par litre (dose conseillée par STEWART et LEONARD, 1953) au mois de mai, sur des clémentiniers de 3 ans greffés sur *Citrus* Taïwanica, association particulièrement sensible aux brûlures. Sur une rangée de 18 arbres (numérotés de 1 à 18 dans le verger), un arbre sur deux a été traité. Au mois de novembre suivant, des mesures d'activité de la nitrate réductase sur 10 arbres et de teneurs en NO_3 des feuilles sur l'ensemble, ainsi que des observations de brûlures ont été effectuées (fig. 2 et tabl. 5).

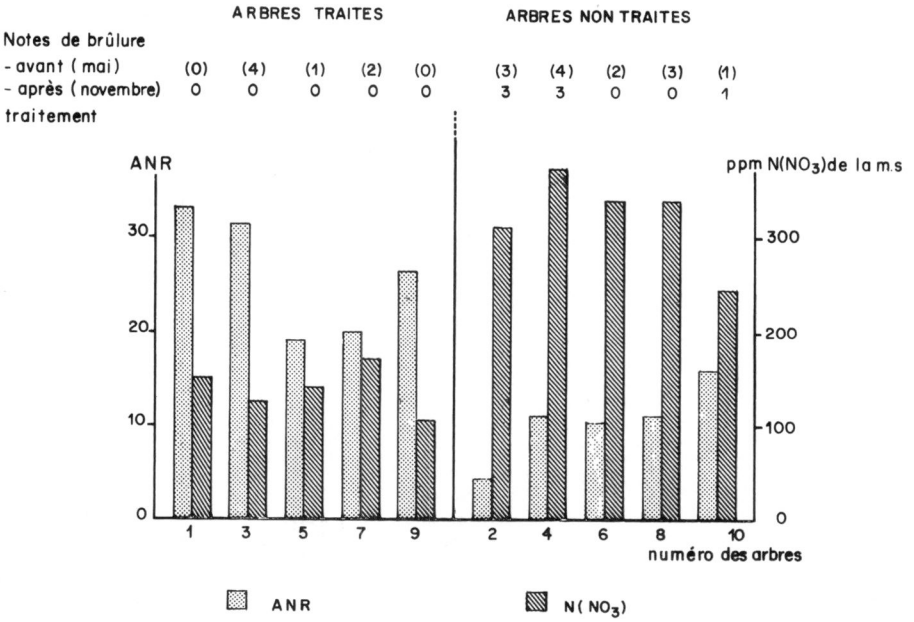


FIG. 2. — *Effet de la pulvérisation de molybdène sur l'ANR, la teneur en N* (NO_3) *et les symptômes observés*

TABLEAU 5

Effet du traitement au molybdène sur l'activité de la nitrate réductase et le taux en NO_3

Moyennes et intervalles de confiance au niveau 1 p. 100 :
l'effet du traitement au molybdène est hautement significatif

	Activité NO_3 red (1)	p.p.m. $N(NO_3)$ (2)
Arbres traités	26,10 ± 6,18	151,1 ± 38,17
Arbres non traités	10,65 ± 4,18	315,3 ± 80,14

(1) Activité de la nitrate réductase sur 5 arbres, avec 2 répétitions par arbre (µg NO_2 formés par g de matière fraîche et par heure).

(2) Teneur en $N(NO_3)$ en p.p.m. de matière sèche : dosage sur 9 arbres.

Dans cet essai, nous avons une corrélation négative ($r = -0,73$, $n = 10$) entre teneur en NO_3 et activité de la nitrate réductase.

La pulvérisation de molybdène a eu pour effet la disparition des symptômes, s'accompagnant d'une augmentation de l'activité de la nitrate réductase et d'une diminution de la teneur en NO_3 des feuilles.

On peut expliquer ces faits par la quantité de molybdène mise à la disposition de la plante : peu de molybdène → activité nitrate réductase faible → accumulation de NO_3, molybdène suffisant → activité nitrate réductase normale → peu de NO_3.

Cet essai nous a donc permis de mettre en évidence une carence en molybdène et d'y remédier par pulvérisation de molybdate d'ammonium.

Toutefois un arbre peut ne plus montrer de symptômes de brûlure (ex. n° 6-8) mais avoir une activité de la nitrate réductase faible et une teneur en nitrates élevée par rapport à un arbre ayant reçu du molybdène. Il peut donc être carencé sans manifester de symptômes. On a d'ailleurs constaté que la plupart des échantillons, prélevés même sur arbres apparemment sains, contiennent de très faibles quantités de molybdène (JUSTE, 1972). Il se peut donc que les symptômes n'apparaissent que dans certains cas critiques et lorsqu'on se trouve dans des conditions climatiques ou édaphiques très particulières.

CONCLUSIONS

Les accidents végétatifs observés en Corse sur sols d'alluvions anciennes acides se rencontrent essentiellement sur l'association clémentinier/*Poncirus*.

Nous avons pu mettre en évidence, par des mesures d'activité de la nitrate réductase et par des déterminations des teneurs en nitrates de feuilles d'arbres sains pour différentes associations, le rôle important du porte-greffe dans l'apparition des brûlures. Sur un autre porte-greffe que le *Poncirus* et sur un même type de sol, le clémentinier a une activité de la nitrate réductase égale aux autres variétés. Par contre, le *Poncirus* confère toujours à l'association une activité de la nitrate réductase plus faible et une teneur en NO_3 plus élevée, quelle que soit la variété considérée.

Les mêmes tests permettent de rendre compte également des différences de sensibilité interclonales.

L'accumulation de nitrates dans les feuilles d'arbres malades est due à une faible activité de la nitrate réductase dont l'origine semble être une carence en molybdène.

Il est possible que le molybdène soit limitant dans la plupart des vergers en sols acides, à des degrés différents : les symptômes sont plus ou moins visibles mais la quantité de molybdène dans les feuilles est en général très faible. Des apports systématiques de molybdène sont maintenant envisagés sur les jeunes arbres dès leur plantation en sols d'alluvions anciennes.

L'hypothèse d'une toxicité de l'aluminium ou d'un autre élément rendu plus assimilable par la plante dans des conditions de sols acides, n'est pas rejetée pour autant. On peut en effet imaginer qu'il existe dans la plante un antagonisme entre Mo et Al (RAINER *et al.*, 1962 et 1972) ; le fait d'apporter Mo supprimerait l'effet toxique d'Al.

Reçu pour publication en janvier 1975.

SUMMARY

VEGETATIVE DISORDERS ON CITRUS IN CORSICA.
MOLYBDENUM DEFICIENCY SHOWED UP BY *IN VIVO* ASSAY
OF NITRATE REDUCTASE ACTIVITY

The simultaneous determination of the *in vivo* nitrate reductase activity and the nitrate content of the leaves enabled us to ascribe the leaf burns observed in young orchards of Clementine grafted on to *Poncirus*, in Corsica, to a molybdenum deficiency. Furthermore, we were able to show an inverse relation between nitrate reductase activity and the sensitivity to burns of root-stock and associated varieties.

ZUSAMMENFASSUNG

WACHSTUMSTÖRUNGEN AUF AGRUMEN IN KORSIKA.
NACHWEISUNG EINES MOLYBDÄNMANGELS DURCH EINEN
MESSUNGTEST DER NITRATREDÜKTASE AKTIVITÄT *IN VIVO*

Die gleichzeitige Bestimmung der Aktivität der Nitratredüktase *in vivo* und des Nitratgehalts der Blätter hat uns erlaubt, die Blattbrandflecken, die auf jungen *Poncirus* gepfropften Clementinebäumen in Korsika beobachtet wurden, einem Molybdänmangel zuzuschreiben. Wir konnen ausserdem ein umgekehrtes Verhältnis zwischen der Aktivität der Nitratredüktase und der Empfindlichkeit für Brandflecken der Unterlagen und der aufgepfropften Sorten nachweisen.

РЕЗЮМЕ

Вегетативные ненормальности на цитрусовых на Корсике. — Выявление недостатка молибдена с помошью применения теста измерения нитрат-редуктазной активности *in vivo*.

АННА-МАРИА БЛОНДЕЛЬ, ДЕНИЗА БЛАН.

Одновременное определение активности нитрат-редуктазы *in vivo* и содержания нитратов в листьях цитрусовых, позволило отнести листовые ожоги, наблюдавшиеся в молодых посадках клемантисов привитых на *Poncirus* на Корсике, к физиологическим последствиям молибденовой недостаточности. При этом была выявлена обратная корреляция между нитрат-редуктазной активностью и чувствительностью подвоев и привитых на них сортов к этим ожогам.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLONDEL A. M., BLANC D., 1975. Mise au point d'une méthode de mesure *in vivo* de l'activité de la nitrate réductase : possibilités d'applications agronomiques en matière de diagnostic. *Ann. agron.*, **26** (3), 309-322.

BLONDEL L., 1971. Les porte-greffe des agrumes in *Les Agrumes*, ouvrage réalisé par un groupe de spécialistes sous la direction de J. C. PRALORAN, Éd. Maisonneuve et Larose, Paris, 89-102.

Bové J. M., Bové C., Cassin J., Jolivet E., Nicol M. Z., 1968. Biochemical studies of leaf burn affected leaves. *Proceed. first international Citrus Symposium*, vol. 3, 1969, 1700-1705.

Cassin J., 1968. Aspects agronomiques d'un accident végétatif observé sur agrumes cultivés sur sols acides en Corse. *IIe Colloque Européen et Méditerranéen sur le contrôle de la fertilisation des plantes cultivées*, Séville, Espagne, 582-591.

Del Brassine Jr., 1965. Échantillonnage des agrumes pour le diagnostic foliaire. I. Revue des principales méthodes utilisées dans le monde. *Fruits*, **20** (1), 9-17.

Juste C., 1972. Communication personnelle.

Lacoeuilhe J. J., Marchal J., Martin-Prével P., 1968. Aspects physiologiques de défoliations anormales des agrumes en Corse. *IIe Colloque Européen et Méditerranéen sur le contrôle de la fertilisation des plantes cultivées*, Séville, Espagne.

Martin-Prevel P. L., Del Brassine J., Lossois P., Lacoeuilhe J. J., 1965. Échantillonnage des agrumes pour le diagnostic foliaire. II. Influence de la position des feuilles sur l'arbre. *Fruits*, **20** (11), 595-603.

Martin-Prével P. J., Lossois P., Lacoeuilhe J. J., Del Brassine J., 1966. Échantillonnage des agrumes pour le diagnostic foliaire. III. Influence du caractère fructifère ou non fructifère des rameaux, de leur hauteur et de l'ombrage. *Fruits*, **21** (11), 577-587.

Mazoyer R., 1972. L'ionométrie : ses possibilités d'application au dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal en agronomie. *Ann. agron.*, **23** (6), 673-684.

Moulinier H., 1968. *Citrus* soils of the eastern coast of Corsica. *Proceed. first international Citrus Symposium*, vol. 3, 1969, 1689-1690 et communication personnelle.

Mulder E. G., Boxma R., Van Veen W. L., 1959. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissue. *Plant and Soil*, X, 335-355.

Nicholas D. J. D., Nason A., 1955. Role of molybdenum as a constituent of nitrate reductase from soybean leaves. *Plant Physiol.*, **30**, 135-138.

Ratner E. I., Smirnov A. M., Huang Hung Shu, 1962. Importance of molybdenum for growth of isolated alfalfa roots in relation to the acidity and aluminium content of the medium. *Sov. Plant Physiol.*, **9** (3), 224-230.

Ratner E. I., Akimochkina T. A., 1972. Protective role of molybdenum in plants and its effect on protein and chlorophyll metabolism in the leaves. *Sov. Plant Physiol.*, **19**, 100-106.

Shaked A., Bar Akiva A., 1967. Nitrate reductase activity as an indication of molybdenum level and requirement of *Citrus* plants. *Phytochemistry*, **6**, 347-350.

Snell F. D., Snell C. T., 1949. *Colorimetric methods of analysis*. D. Van Nostrand Company, Inc., vol. II, 804-805.

Stewart J., Leonard C. D., 1951. Molybdenum deficiency in *Citrus*. *Proc. Fla. Sta. Hort. Soc.*, **64**, 51-53.

Stewart J., Leonard C. D., 1953. Correction of molybdenum deficiency in Florida *Citrus*. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, **62**, 111-115.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 289-307.

IMPLICATIONS AGRONOMIQUES DE LA SÉLECTION ALIMENTAIRE EXERCÉE PAR LES OVINS SUR LES CONSTITUANTS D'UNE VÉGÉTATION PÂTURÉE

P. LOISEAU et G. BECHET*
avec la collaboration technique de G. MERLE et A. BRELURUT*

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
63100 Clermont-Ferrand

* *Station de Recherches sur l'Élevage des Ruminants,*
Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, I. N. R. A.,
Theix, Saint Genès Champanelle, 63110 Beaumont

RÉSUMÉ

La technique de fistulation de l'œsophage et d'examen des bols alimentaires des herbivores est utilisée pour analyser la sélectivité de la pâture sur une pelouse montagnarde contenant une forte proportion de refus. La variation des préférences alimentaires pour les différents types de fourrage selon la charge, la saison et le nombre d'années de pâture, ouvrent une discussion à propos de l'amélioration des pelouses à *Nardus stricta* et de la typologie des parcours sur la base de la composition botanique.

INTRODUCTION

Les Zootechniciens (DEMARQUILLY, 1968 ; DEMARQUILLY et JARRIGE, 1971) utilisent pour exprimer la qualité d'un fourrage la notion de valeur alimentaire (1). Cette valeur intrinsèque du fourrage pour l'animal est établie pour des aliments homogènes distribués seuls à des moutons maintenus en cages à bilan et n'ayant que le choix de la quantité. Sur une prairie ou un parcours, l'animal sélectionne les composantes du bol alimentaire ; l'existence d'un choix ne permet plus de parler d'une valeur alimentaire du fourrage offert, mais seulement d'une valeur alimentaire du fourrage

(1) Produit de la valeur énergétique par l'ingestibilité. La valeur énergétique est exprimée en unités fourragères par kg de matière sèche et l'ingestibilité en kg de matière sèche ingérée pour 100 kg de poids métabolique de l'herbivore.

récolté. Le déterminisme du choix est donc un problème-clé du raisonnement de la conduite du pâturage.

Les facteurs qui modifient la sélection au pré par l'animal sont encore mal connus : alors que les préférences absolues des animaux ont été montrées depuis longtemps dans les « libre-services » pour ruminants (IVINS, 1952 ; VOISIN, 1957), celles qui s'expriment sous les contraintes de pâturage sont d'un développement plus récent. HUNTER (1954, 1960), ARNOLD *et al.* (1966), VAN DYNE et HEADY (1969), BUCHANAN *et al.* (1972), MALECHEK et LEINWEBER (1972), ont répertorié différents paramètres actifs de la sélectivité au pâturage, liés au végétal (saison, fertilisation), à l'animal (charge, type d'herbivore), à la conduite du pâturage (moment du séjour des animaux, nombre d'années de pâture). Nous nous proposons de chercher dans quelle mesure, sur un pâturage de composition botanique donnée, la composition du bol alimentaire récolté par le bétail dépend d'une part, des préférences absolues de l'animal, d'autre part, des possibilités de choix qui lui sont offertes.

La connaissance du choix « au pré » apporte deux sortes de renseignements d'ordre agronomique. D'une part, les différentes intensités de pâture subies par les composantes de la végétation font partie d'un traitement différentiel des espèces par l'animal, et peuvent expliquer ou permettre de prévoir l'évolution de la composition botanique. D'autre part, ces renseignements amorcent une discussion sur la typologie des formations végétales : en effet, les pastoralistes s'attachent depuis longtemps à déterminer la valeur pastorale des formations pâturées sur la seule base de la composition botanique. Après avoir analysé l'action de différents facteurs sur la sélection au pré, nous tirerons les conséquences de ces résultats sur les possibilités d'évolution de la végétation et sur la notion de valeur pastorale.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODES

1. — *Dispositif expérimental*

A 1350 m d'altitude dans le massif des Monts Dore (Puy de Dôme), nous avons mesuré la composition du tapis végétal offert en pâture à des brebis, et celle des bols alimentaires correspondants, prélevés par ces animaux.

La formation végétale est une pelouse montagnarde acidophile dominée par *Nardus stricta* L., espèce qui représente environ un tiers du poids de l'herbe. La nardaie apparaît dans des conditions écologiques très précises : un pâturage libre avec exportation des excrétats vers la zone de parcage de nuit ; le mode de pâture laisse s'exprimer le choix des animaux (KLAPP, 1950, 1965), et certaines espèces peuvent être surpâturées alors que le Nard est refusé. DE MONTARD et GACHON (1972) estiment que les quantités d'herbe ingérées représentent seulement un quart à un tiers de la production épigée. Cela explique la persistance au cours de l'année de grandes masses d'herbe dont une quantité importante se dessèche sur pied. Pour cette raison, TURCEK et SUSLIK (1971) qualifient la Nardaie d'écosystème de type « detritus ».

Sur cette pelouse, plusieurs pâturages ont été mis en place en 1972 (fig. 1). Chacun est exploité par son propre troupeau de 40 brebis gestantes, et comporte 4 parcs sur lesquels on effectue 3 cycles pendant la brève saison d'estive. Ils ne diffèrent que par la charge en brebis : les pâturages « forte charge » et « faible charge » supportent respectivement des chargements moyens de 10 et 5 brebis par hectare pendant les 140 jours de pâture. Au premier cycle, les temps de séjour sur un parc sont limités à 7 jours, de façon à pâturer rapidement l'ensemble des surfaces pendant la montaison précoce du Nard. Aux cycles suivant, les temps de séjour sur un parc sont de 2 semaines.

Notre hypothèse de travail est que la composition botanique de la nardaie, primitivement en équilibre dans un système de pâturage libre avec exportation des excrétats, est susceptible d'évoluer d'autant plus rapidement que la charge est forte, vers la composition botanique d'équilibre

correspondant au pâturage tournant : *Agrostis tenuis, Festuca rubra, Trifolium repens.* L'animal est employé comme traitement agronomique mais reste aussi le but zootechnique : les charges employées assurent une productivité du troupeau et une productivité des surfaces viables dans les conditions socio-économiques actuelles. L'aspect zootechnique donnera lieu à une publication ultérieure.

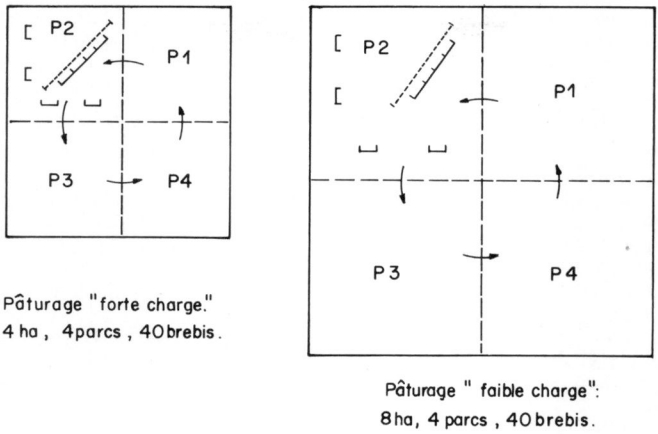


FIG. 1. — *Schéma du dispositif et emplacement des mesures relatives à la végétation*

——— limite de pâturage ; ——— limite de parc ; P2 : Numéro du parc dans l'ordre de la rotation (↷) du troupeau ;
------ localisation des mesures de composition botanique (100 points quadrats) ;
⌴ mesure de la masse d'herbe sur pied (8 bandes de 10 m de long)

2. — *Méthodes relatives à la végétation*

Les quantités de matière sèche offertes par hectare aux animaux avant chaque cycle sont mesurées par fauche à la tondeuse à moutons, de 8 bandes de 10 m de long, convenablement disposées dans un des 4 parcs pour représenter la biomasse aérienne sur l'ensemble du parc. Cette technique a été proposée par l'Institut de Hurley (1961). A la différence d'autres techniques, elle permet de couper l'herbe en épousant le micro-relief du terrain qui est souvent tourmenté dans les pâtures. Sa souplesse d'utilisation et sa largeur de coupe (6 cm) imitent le prélèvement par la mâchoire de l'animal. La hauteur de coupe est relativement sévère, mais très constante au niveau des organes des plantes. Nous considérons que cette méthode simule une exploitation complète et homogène des organes aériens laissant à nu les collets. En outre, 20 poignées d'herbe prélevées à la même hauteur de coupe sont triées pour mesurer dans la masse totale, les parts qui reviennent au stock d'herbe vivante et au stock d'herbe morte sur pied.

Une estimation du pourcentage des différentes espèces en matière sèche est donnée par la méthode des volumes spécifiques (POISSONET, 1969) ; la technique employée, inspirée de KERGUELEN (1972) consiste à noter sur 100 points quadrats l'abondance relative des espèces présentes de façon que la somme des notes distribuées sur un point quadrat égale 6. Dans ces conditions, le volume spécifique VS*i* est donné en p. 100 par le sixième de la somme des notes attribuées à l'espèce *i* pour les 100 points quadrats.

Les points quadrats sont fixes et programmés sur le terrain (fig. 1). De même, les masses d'herbe sont récoltées sur des lignes repérées mais légèrement décallées à chaque prélèvement pour éviter de couper deux fois au même endroit. Toutes les mesures sont effectuées avant chaque séjour du troupeau.

3. — *Méthodes relatives aux bols alimentaires*

Nous avons utilisé des brebis fistulées de l'œsophage et munies de canules en T selon la méthode mise au point par TORREL (1954), reprise par MCMANUS *et al.* (1962) et VAN DYNE *et al.* (1967). Entre les prélèvements, les animaux opérés sont mis à pâturer dans un enclos plus commode contenant des espèces de la Nardaie. Cette procédure assure de meilleures conditions pour la surveillance des fistules et pour la mise à jeun des brebis pendant la nuit qui précède la mesure.

Ces animaux (4 en 1972 et 4 autres en 1973) sont laissés le matin du prélèvement avec le troupeau pendant environ 45 minutes, après démontage de la canule et pose d'un sac de récolte. Les prélèvements sont effectués 4 jours consécutifs, à raison de 2 jours sur la charge faible et 2 jours sur la charge forte. La fréquence des prélèvements est de 2 fois par cycle. Après élimination des bols alimentaires montrant des régurgitations ou un manque d'appétit, il restait pour l'analyse 40 récoltes pour 1972 et 80 pour 1973.

Sur chaque récolte, un échantillon représentatif est prélevé pour l'analyse botanique. Après un double lavage dans l'acide acétique dilué à 5 p. 100 et un filtrage, l'échantillon est étalé sur une boîte de Pétri. La méthode de comptage est similaire à celle décrite par HEADY et TORREL (1959) et reprise par HARKER *et al.* (1964), VAN DYNE et HEADY (1969), MALECHEK et LEINWEBER (1972). La boîte de Pétri est placée sur un treillis de 100 points sur chacun desquels on note les espèces dont les fragments sont présents. L'abondance d'une espèce dans le bol alimentaire est donnée en p. 100 par le nombre de présences de cette espèce rapporté au nombre total de présences : nous l'appelons contribution spécifique dans le bol alimentaire.

Devant la difficulté d'attribuer certains fragments à une espèce bien déterminée, des groupements d'espèces ont été établis sur des critères de classification botanique (espèces graminéennes ou non) et de morphologie (graminées à limbes larges ou étroits). Les fragments restant indéterminés dans cette classification plus large ne dépassent plus alors 11 p. 100 du nombre total de fragments et correspondent surtout à des brins mâchés et indéterminables.

Si l'on peut contester parfois la justesse des méthodes dites « de rang » pour les VS_i du tapis végétal, et « de présence » pour les CS_i des bols alimentaires, relativement à une approche très précise du pourcentage en masse des différentes espèces, on ne peut mettre en doute leur fidélité, et c'est ce qui est essentiel lorsque l'on se propose de comparer leurs variations relatives.

RÉSULTATS

1. — *Végétation*

Les catégories d'espèces sont définies par les listes suivantes :

— le groupe des graminées à feuilles fines comprend *Deschampsia flexuosa* (L.), *Festuca duriuscula* (L.), *Festuca rubra* (L.) ; le Nard a été comptabilisé à part ;

— les graminées à feuilles larges sont : *Anthoxanthum odoratum* (L.), *Poa chaixii* VILL., *Agrostis vulgaris* WITH. ;

— le groupe des « espèces diverses » est bien plus hétérogène : il comprend *Potentilla aurea* (L.), *P. tormentilla* (L.), *Polygonum bistorta* L., *Galium Hercynicum* WEIGEL, *Luzula campestris* L., *Carex caryophyllea* LATOURR., *Leontodon Pyrenaicus* GOUAN, *Meum athamanticum* JACQ., *Genista pilosa* L., *Gentiana lutea* L., *Narcissus Jonquilla* L., *Anemone nemorosa* L., et d'autres espèces plus rares : *Vaccinium myrtillus* L., *V. uliginosus* L., *Jasione montana* L., *Selinum pyrenaeum* (L.), *Arnica montana* L.

Les résultats concernant la végétation sont donnés dans le tableau 1. On note peu de variations saisonnières importantes dans l'abondance relative des espèces ou groupes d'espèces principaux. Sur le pâturage forte charge, le groupe des « espèces diverses » montre toutefois une diminution au cours de la saison : en effet, la plupart ont une tendance géophyte marquée et leur durée de végétation est courte et précoce ; pour une autre part, il est possible que l'action de plusieurs cycles de pâture successifs contribue à en réduire l'abondance. Toutefois, on retiendra que l'ensemble de la composition botanique ne se modifie pas sensiblement d'une saison à l'autre, ni d'ailleurs d'une année à l'autre, pour les deux premières années de mise en pâturage tournant ; en première approximation, la composition botanique est stable, ce qui donne plus de poids à la comparaison des bols alimentaires.

Il en va tout autrement de la répartition de l'herbe entre organes vivants

TABLEAU I. — *Évolution de la composition botanique de la nardaie au cours des 2 années de mise en pâturage tournant* (en p. 100 de la MS)

Année de mise en pâturage	1972 (1re année)				1973 (2e année)	
Cycle et moment du cycle	Début du 1er cycle	Début du 2e cycle	Fin du 2e cycle	Début du 3e cycle	Début du 1er cycle	Début du 3e cycle
Cas de la forte charge						
Herbe verte	41	50	67	63	46	69
Herbe sèche	59 (1)	50	33	37	54	31
Détail de l'herbe verte :						
Nardus stricta	27	29	37	34	30	38
Graminées à feuilles larges	17	16	18	22	16	22
Graminées à feuilles fines	23	24	17	20	25	21
Diverses	33	29	28	24	29	19
Cas de la faible charge						
Herbe verte	28	50	61	61	34	69
Herbe sèche	72 (1)	50	39	39	66	31
Détail de l'herbe verte :						
Nardus stricta	32	24	33	41	34	36
Graminées à feuilles larges	29	33	24	22	26	26
Graminées à feuilles fines	12	13	10	9	18	18
Diverses	27	30	33	28	22	20

(1) En début d'expérience, le pourcentage d'herbe sèche est plus élevé sur la « charge faible » : lors de l'année précédant la mise en place du dispositif, il est possible que l'endroit du pâturage « faible charge » ait été moins bien pâturé que celui de la « forte charge ».

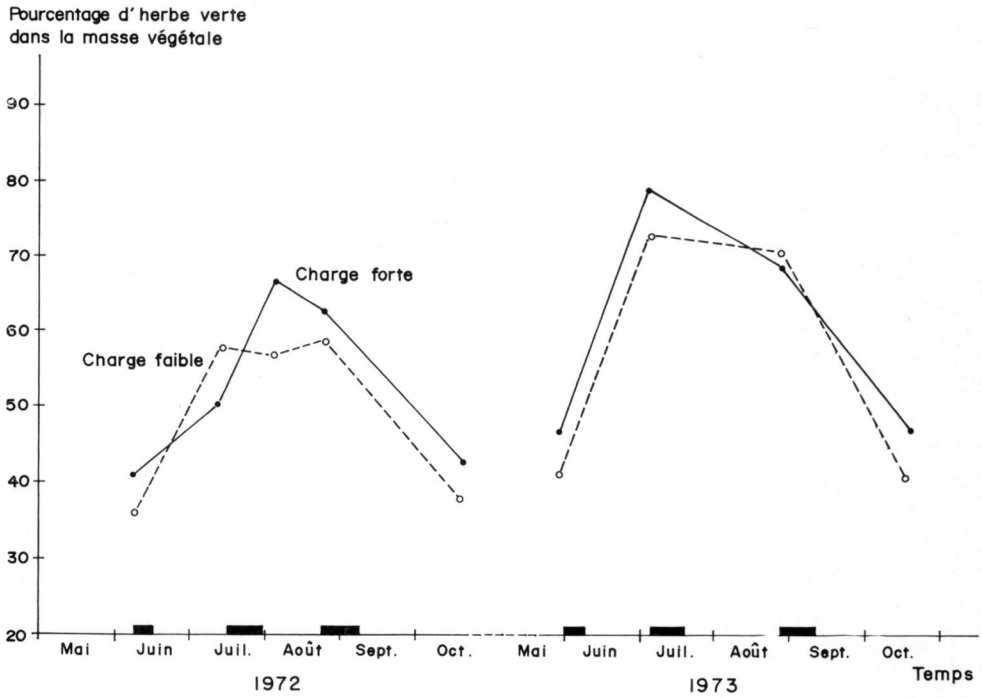


FIG. 2. — *Évolution du pourcentage d'herbe verte dans le fourrage sur pied en fonction de la charge au cours de 2 saisons de pâturage*

■ périodes de pâture

TABLEAU 2. — *Composition des bols alimentaires au cours de 2 années de mise en pâturage tournant*
(Chiffres de base en p. 100 corrigés par suppressions indéterminables supposées également réparties)

	Année	1972				1973					
	Cycle	2e cycle		3e cycle		1er cycle		2e cycle		3e cycle	
	Parc et moment du séjour	P_2 début mi-juil.	P_2 fin fin juil.	P_1 fin fin août	P_2 début début sept.	P_2 milieu fin mai	P_4 milieu mi-juin	P_2 milieu mi-juil.	P_4 milieu début août	P_2 milieu début sept.	P_4 milieu début oct.
Charge forte	*1. Division selon la vitalité de l'herbe*										
	Herbe sèche	12,0	7,9	35.3	32,9	30,2	11,1	13,9	25,1	27,5	27,6
	Herbe vivante	88,0	92,1	64,7	67,1	69,8	88,9	86,1	74,9	72,5	72,4
	2. Division selon la composition botanique de l'herbe verte										
	Nard	13,2	20,6	10,0	13,7	5,1	10,0	12,1	7,8	12,4	20,8
	Graminées à feuilles larges	13,9	10,4	12,8	7,3	18,3	27,5	35,0	41,9	35,8	26,1
	Graminées à feuilles fines	40,3	37,9	61,6	63,8	55,5	51,9	37,2	46,1	46,8	49,4
	Diverses	32,6	31,0	15,6	15,2	21,1	10,7	15,6	4,2	5,0	3,7
	Teneur d'origine en indéterminables	6,3	3,5	80	7,7	6,0	5,9	6,9	7,1	4,6	4,6
Charge faible	*1. Division selon la vitalité de l'herbe*										
	Herbe sèche	8,0	7,5	37,1	29,9	32,1	10,6	13,1	20,3	22,2	30,5
	Herbe vivante	92,0	92,5	62,9	70,1	67,9	89,4	86,9	79,7	77,8	69,5
	2. Division selon la composition botanique de l'herbe verte										
	Nard	13,8	19,6	19,4	12,4	9,9	6,1	10,9	3,3	10,0	12,3
	Graminées à feuilles larges	18,4	18,2	5,6	4,6	22,9	17,2	27,3	35,0	29,9	24,6
	Graminées à feuilles fines	39,0	39,0	47,4	50,2	54,2	57,6	38,1	45,9	54,3	60,1
	Diverses	28,9	23,2	27,7	32,8	13,0	19,1	23,7	15,8	5,8	3,1
	Teneur d'origine en indéterminables	4,2	3,9	10,8	9,4	7,9	7,2	7,7	6,8	3,9	4,3

chlorophylliens et organes morts et desséchés : le pourcentage d'herbe verte varie dans le temps et sous l'influence de la charge ; il est maximum en juillet au 2e cycle, augmente de la première à la deuxième année de pâture, et de la charge faible à la charge forte (fig. 2). En même temps, les quantités totales d'herbe sur pied diminuent (fig. 3) ; ce « nettoyage du terrain » par l'animal est bien connu des éleveurs.

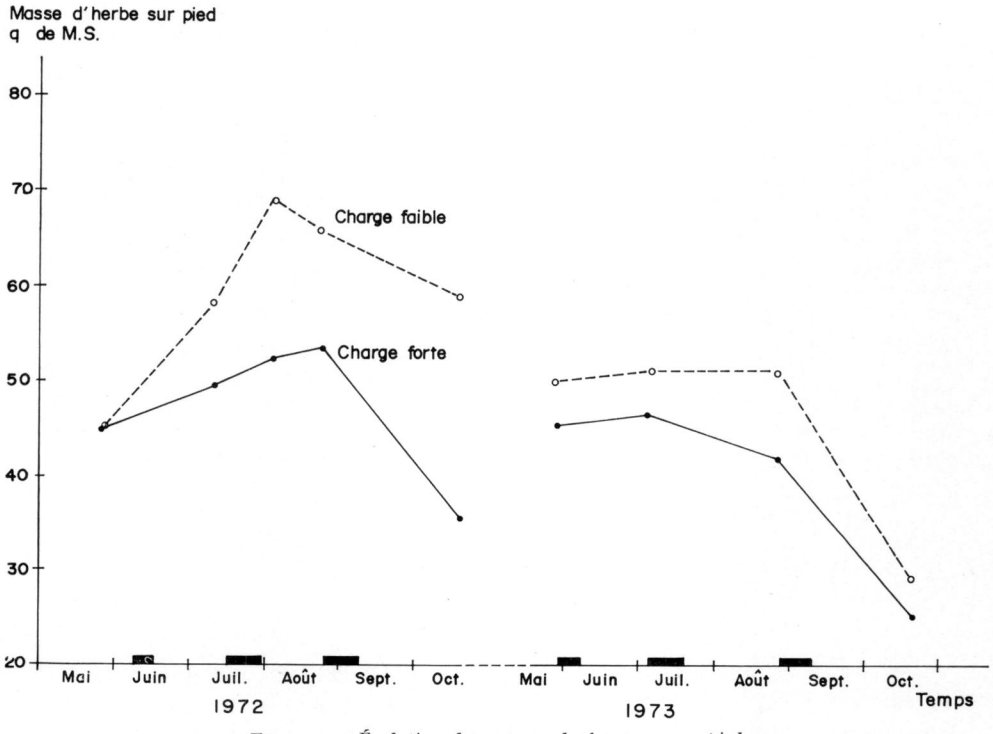


FIG. 3. — *Évolution des masses de fourrage sur pied en fonction de la charge au cours de 2 saisons de pâturage*

■ périodes de pâture

2. — *Bols alimentaires*

Le tableau 2 donne les résultats concernant les bols alimentaires. Dans la mesure où l'on considère la relative constance du tapis végétal offert aux animaux, il est possible de tirer quelques considérations de ces résultats : dans le tableau 3, nous donnons, autres paramètres confondus, l'influence des paramètres suivants : moment du séjour sur un parc, numéro du cycle, première ou deuxième année de pâturage tournant, charge en brebis.

Au cours d'un même séjour, on observe du début à la fin, une baisse de consommation des espèces diverses et une augmentation de la consommation de Nard. Le numéro d'ordre du cycle, lié aux variations saisonnières, agit fortement sur le choix des animaux : la quantité d'herbe sèche prélevée est importante à l'arrivée sur le pâturage début juin, puis diminue au deuxième cycle pour augmenter fortement en fin de saison ; la contribution des espèces diverses dans le bol alimentaire diminue au

cours de la saison de pâturage ; à l'intérieur des graminées fourragères, il semble se produire au cours du deuxième cycle un report de consommation des graminées à feuilles fines vers les graminées à feuilles larges. Au fil des deux années de pâturage, la proportion « d'espèces diverses » et de Nard dans le bol alimentaire diminue au profit des graminées à feuilles larges.

TABLEAU 3

Influence de différents paramètres sur la composition du bol alimentaire

Paramètre	Charge en brebis		N° du cycle (1)			Moment du cycle (2)		Année de pâturage (3)	
	forte	faible	1	2	3	début	fin	1972	1973
Herbe sèche	22,3	21,1	21,0	18,1	26,9	10,0	7,7	21,3	22,5
Nardus stricta	12,6	11,8	7,8	8,6	13,9	13,5	20,1	15,3	11,2
Graminées à feuilles larges	22,9	20,4	21,5	34,8	29,1	16,1	14,3	11,4	31,9
Graminées à feuilles fines	49,0	48,6	54,9	41,8	52,7	39,6	38,4	47,4	47,2
Diverses	15,5	19,3	16,0	14,8	4,4	30,8	27,1	25,9	9,6

(1) Pour 1973.
(2) Pour le 2e cycle de 1972.
(3) Pour les 2e et 3e cycles.

Les « espèces diverses » forment un groupe hétérogène comprenant des plantes différemment acceptées par le bétail. La consommation de Gaillet augmente au fil des cycles alors que celle du Polygonum diminue. La Gentiane et le Leontodon sont consommés surtout au deuxième cycle. La consommation de Polygonum et de Potentilles diminue beaucoup en deuxième année de pâture, ce qui est responsable pour une grande part de la baisse d'ingestion des « espèces diverses ». Le Genêt pileux, seule légumineuse de la pelouse, est représenté dans les bols alimentaires malgré sa rareté, et cette espèce, mal adaptée à la pâture par son port de chaméphyte, disparaît progressivement.

Dans la charge faible qui, *a priori*, permet les meilleures possibilités de choix, les groupes les plus consommés par rapport à la charge forte sont l'herbe verte, les graminées à feuilles fines et les « espèces diverses » ; quand le choix est possible, il se fait aux dépens de l'herbe sèche, du Nard, et le cas échéant, des graminées à feuilles larges, le groupe des graminées à feuilles fines restant le plus consommé (40 à 60 p. 100 du bol alimentaire).

3. — *Comparaison de l'herbe offerte et prélevée*

Avant de présenter les résultats comparatifs de composition du tapis végétal et des bols alimentaires, il est nécessaire de faire une mise au point sur les termes à

employer : d'une part les termes relatifs aux préférences alimentaires proprement dites, qui précisent ce que peut être une *mesure de choix*, d'autre part les termes relatifs aux conditions dans lesquelles s'exprime le choix ou « *paramètres du choix* ».

a) *Notions sur la mesure du choix alimentaire.*

— *Ingestibilité.*

Le déterminisme du choix en fourrages homogènes est donné par DEMARQUILLY (1968, 1970) : l'ingestibilité des fourrages verts tient peu à leurs qualités gustatives ; il est maintenant bien établi que la quantité de fourrages secs consommés est avant tout réglée par des phénomènes de nature physique au niveau du rumen. Actuellement, on emploie donc de préférence le terme *d'ingestibilité* pour parler des quantités ingérées lorsqu'elles dépendent uniquement de régulations physiques internes, spécialement la vitesse de digestion ; à ce niveau, intervient la proportion de membranes dans l'aliment, qui varie en fonction du stade de la plante à la récolte.

— *Appétibilité.*

Il n'en reste pas moins que l'animal à qui l'on donne toutes les possibilités de choix, peut exprimer des préférences entre plusieurs fourrages homogènes d'ingestibilité égale. La notion *d'appétibilité* a été définie par les auteurs anglo-saxons à partir d'expériences de type « libre service » où l'animal disposait à profusion de plusieurs fourrages entre lesquels on voulait déterminer les préférences relatives, par les quantités ingérées ou le temps de pâture.

Selon IVINS (1952), l'appétibilité est la « somme des facteurs qui agissent pour déterminer si un aliment plaît à l'animal et à quel degré il apprécie le goût : l'appétibilité est le lien entre l'herbe et l'animal qui la pâture ». On s'est aperçu depuis, qu'en toute liberté de choix (GARNER, 1963), le goût n'était pas le seul lien entre l'herbe et l'animal, et que les plus grandes variations des quantités ingérées en « libre service » étaient souvent dûes aux phénomènes d'ingestibilité. En conséquence, les auteurs donnent actuellement une notion plus restrictive de l'appétibilité : YOUNG (1968) la définit comme « la réponse hédonistique à un aliment selon son goût, son odeur, sa température, son toucher, son apparence... ».

Dans ce sens nouveau, l'appétibilité est uniquement déterminée par les sens, directement (instinct) ou indirectement (habitude). Réciproquement, l'appétance de l'animal pour un aliment est déclenchée par les propriétés organoleptiques de cet aliment. A ingestibilité égale, on peut alors parler de correspondances entre l'olfaction de l'animal et l'odeur de la plante, le toucher et par exemple la vulnérabilité ; mais selon GORDON (1970), on ne peut mettre en cause qu'avec prudence le goût et la vue chez les ruminants domestiques.

— *Acceptabilité.*

Lorsque l'on considère le choix de l'animal au pâturage et que l'on mesure les quantités ingérées sans présumer de leur déterminisme, nous parlerons, au niveau de l'animal, de préférence exprimée au pâturage. MCCLYMONT (1968) réserve le mot « edibility » comme terme descriptif et non interprétatif du même phénomène consi-

TABLEAU 4

Comparaison des acceptabilités spécifiques (A. S.) *et des possibilités quantitatives de choix* (P. Q. C.) *selon l'année et le cycle de pâturage*

Année	1972				1973						Moyenne	
N° du cycle de passage des animaux	2e cycle (1)		3e cycle (2)		1er cycle (3)		2e cycle (3)		3e cycle (3)			
Charge	forte	faible	forte	faible	forte	faible	forte	faible	forte	faible	forte	faible
Herbe totale												
PQC	7	17	8	18	—	34	6	17	5	16	7	20
AS herbe sèche	0,2	0,2	0,9	0,8	0,6	0,5	0,7	0,5	0,9	0,7	0,7	0,5
AS herbe verte	1,6	1,6	1,1	1,2	1,5	2,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,3	1,4
Herbe verte												
PQC	3,7	9,3	4,4	10,7	5,5	8,6	4,8	11,4	4,0	11,0	4,4	9,6
AS *Nardus stricta*	0,5	0,6	0,4	0,3	0,2	0,3	—	—	0,3	0,3	0,3	0,3
AS Graminées à feuilles larges	0,7	0,7	0,3	0,2	1,1	0,9	—	—	1,6	1,1	0,9	0,7
AS Graminées à feuilles fines	1,9	3,4	3,2	5,6	2,2	3,0	—	—	2,2	3,0	1,9	3,7
AS Espèces diverses	1,1	0,8	0,6	1,1	0,7	0,7	—	—	0,3	0,3	0,7	0,7

(1) Les acceptabilités sont les moyennes de celles de début et de fin de séjour.
(2) Les bols alimentaires n'ont été mesurés qu'en début de séjour.
(3) Les bols alimentaires ont été mesurés en milieu de séjour.

déré comme une propriété de la plante. A cause de difficultés de traduction, nous emploierons le terme d'acceptabilité spécifique au pâturage. L'expression, utilisée dans la littérature française comme équivalent d'ingestibilité, est tombée en désuétude. Sa traduction anglaise est déjà employée par les physiologistes anglo-saxons ; YOUNG et GREEN (1968) proposent « que le terme d'acceptabilité soit employé dans son sens objectif sans prédisposer des conditions qui la déterminent ».

Pour exprimer les acceptabilités, le pourcentage dans le bol alimentaire ne suffit pas ; de plus, il devient impossible d'établir des comparaisons lorsque la composition botanique varie. Pour cette raison, BUCHANAN (1972) propose le « relative preference index », défini, pour une espèce, par le rapport de sa masse relative dans le bol alimentaire à sa masse relative dans le tapis végétal. Dans notre système de mesure, l'indice de préférence est estimé par le rapport :

$$\frac{CS_i \text{ bol alimentaire}}{VS_i \text{ tapis végétal}}$$

il doit être un bon indicateur des acceptabilités spécifiques : si le rapport vaut I, l'espèce est mangée à proportion de l'offre ; inférieur à I, il signifie une tendance au refus, et supérieur à I, il indique les espèces recherchées.

b) *Paramètres actifs du choix.*

Un premier paramètre est simplement qualitatif : nous l'appelons « possibilité qualitative de choix ». Il varie selon le numéro du cycle et selon le nombre d'années de pâture : en effet, la saison et le nettoyage du terrain par l'animal peuvent déterminer des changements dans la physionomie de la végétation et dans son aptitude à la sélection.

Un deuxième paramètre mesure la notion de charge, habituellement donnée par le nombre ou le poids d'animaux à l'hectare. Cette définition est insuffisante car la pression imposée aux animaux varie, à charge égale, en fonction des quantités d'herbe offertes. MOTT (1960) propose le terme d'intensité de pâturage pour le nombre d'animaux par unité de fourrage disponible (traduction par IVINS de « grazing capacity »). Nous préférons employer pour notre part un paramètre inverse que nous appellerons « possibilités quantitatives de choix », mesuré par le rapport :

$$\frac{\text{MS offerte aux animaux au début du cycle}}{\text{Besoin en MS des animaux pendant le cycle}}$$

Ce taux varie de 1 pour les prairies très intensifiées où le choix serait rigoureusement impossible, à plusieurs dizaines pour les parcours extensifs ; il représente le nombre par lequel il faudrait multiplier le troupeau si l'on était dans un système où toute l'herbe présentée est pâturée. Nous calculons les besoins en matière sèche sur la base de 1,3 kg de MS par brebis de 65 kg de poids vif et par jour, qui est le chiffre moyen mesuré par ailleurs sur notre dispositif.

Le tableau 4 donne à comparer les acceptabilités spécifiques avec les possibilités quantitatives de choix dans les différentes conditions de cycle et d'années de pâturage.

Pour les « espèces diverses », la précision des mesures ne permet que des comparaisons moyennes :

	Pourcentage dans le tapis végétal	Pourcentage dans le bol alimentaire
Espèces plutôt refusées		
Carex et Luzule	3 à 10	0 à 2
Galium hercynicum	1 à 5	0 à 2
Leontodon pyrenaicus	1 à 5	0 à 1,5
Espèces indifférentes		
Meum athamanticum	0 à 6	0 à 5
Potentilles	0 à 13	0 à 13
Polygonum bistorta	0 à 7	0 à 7
Espèces recherchées		
Gentiana lutea	0 à 1	0 à 3
Genista pilosa	0 à 2	0 à 5
Narcissus jonquilla	(observation directe)	

L'herbe sèche est toujours refusée ; son acceptabilité reste presque indépendante des possibilités quantitatives de choix et c'est le paramètre qualitatif qui intervient au premier chef : lorsque l'on avance dans la saison de pâturage, il est de plus en plus difficile aux brebis d'éviter la consommation d'herbe morte.

Le refus de *Nardus stricta* est constant et ne dépend pas des possibilités quantitatives de choix.

L'acceptabilité des graminées à feuilles larges et à feuilles fines est au contraire, en premier lieu, fonction des possibilités quantitatives de choix : quand le choix augmente, l'acceptabilité des graminées à feuilles larges (moins appréciées) diminue, et celle des graminées à feuilles fines (recherchées) augmente. La quantité de graminées à feuilles fines est donc un facteur limitant du choix : la consommation se reporte, en première année de pâture surtout, sur les « espèces diverses » et, en deuxième année, sur les graminées à feuilles larges.

En définitive, on peut distinguer trois catégories de fourrages selon ce qui limite le choix par l'animal : les « mauvaises herbes » sont refusées mais il existe une consommation minimum dépendant uniquement du paramètre qualitatif ; les espèces préférées sont pâturées au maximum et la limite de consommation dépend essentiellement des possibilités quantitatives de choix ; les espèces moyennement appréciées sont ingérées dans des proportions variables, à défaut de mieux, lorsque le choix quantitatif des bonnes espèces se restreint.

Les acceptabilités spécifiques ne sont donc pas des constantes ; elles dépendent des conditions de pâture. Les préférences exprimées au pré intègrent non seulement des préférences absolues mettant probablement en jeu les appétibilités et ingestibilités spécifiques, mais aussi des contraintes liées à la conduite du pâturage et à la présentation de l'herbe à la dent des animaux.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

1. — *Paramètre qualitatif*

Si l'interprétation de l'influence des possibilités quantitatives de choix est facile, il en va autrement de celle du paramètre qualitatif (influence du cycle et du nombre d'années de pâture). La variation des acceptabilités tiendrait soit à des modifications du tapis végétal non révélées par la mesure des compositions botaniques, soit à des modifications du comportement alimentaire des ovins. Une interprétation zootechnique est plausible au niveau des variations saisonnières mais beaucoup moins à celui des variations interannuelles. En revanche, on peut avancer dans les 2 cas une interprétation agronomique par un changement de la structure du peuplement. Selon GOUNOT (1969), la structure est la disposition et l'organisation entre eux des éléments et des strates de la phytocoenose ; la structure donne à la phytocoenose sa physionomie. En effet, il n'est pas impossible que, sous l'influence du climat saisonnier ou sous celle des années successives de pâture, le peuplement soit modifié du point de vue de son aptitude à la sélection :

a) *Phénomènes saisonniers.*

Au premier cycle, les nouvelles feuilles vertes percent à travers les anciennes feuilles sèches tassées par la couverture de neige ; au deuxième cycle, on constate un dessèchement à la pointe des feuilles ; au troisième cycle, le feuillage situé à la portée immédiate des brebis est mort en partie. La disposition de l'herbe sèche est donc, selon les saisons, plus ou moins propice à son refus ; en fin de saison, la consommation obligatoire d'herbe morte est élevée, d'où une hausse de l'acceptabilité.

b) *Phénomènes d'évolution interannuelle.*

Avec le « nettoyage du terrain » montré plus haut, on a déjà évoqué un changement de la végétation accéléré par la charge. Il est probable que ce phénomène s'accompagne d'autres évolutions du tapis végétal qui seraient à l'origine d'un changement des possibilités de choix ; en particulier, les différentes catégories de fourrages sont moins intriquées, ce qui peut améliorer l'aptitude du couvert végétal à la sélection. A notre avis, l'ensemble de ces changements marque une phase d'évolution qui fait passer d'un écosystème de type « détritus » à un écosystème plus véritablement prairial, et qui pourrait précéder certaines modifications de la composition botanique.

2. — *Refus du Nard*

A une petite consommation obligatoire près, le refus du Nard est en quelque sorte absolu. Dans une optique d'éradication de cette espèce, il est important de chercher les raisons d'une sélection aussi constante de la part des ovins. BRYNMOR et FAIRBAIRN (1956) ont mesuré chez le Nard des digestibilités de la matière organique variant de 62 p. 100 en juin à 51 p. 100 en octobre ; parallèlement, la digestibilité de la matière azotée totale variait entre 72 et 41 p. 100. Dans ces conditions, il est peu probable que le refus soit dû à une faible digestibilité ; son explication pourrait tenir à la présence de petites dents siliceuses obliques, rangées sur toute la

longueur du bord des feuilles ; ces spicules, jointes à la raideur des limbes (noms vernaculaires de « Poil de Bouc » ; allemand « Borstgrass »), les rendent peut être vulnérants pour les voies alimentaires. Les autres graminées ayant au contraire des feuilles souples et lisses, la faible acceptabilité du Nard aurait son origine dans une mauvaise appétibilité relative.

Il est possible d'objecter que la structure de la touffe de Nard, où se mélangent en permanence des feuilles vertes et des feuilles sèches, serait suffisante pour occasionner un refus ; or, la figure 4 montre que le Nard sec est en moyenne deux fois plus refusé que le reste des herbes sèches. C'est donc très probablement la vulnérabilité ou la teneur en silice qui détermine le refus ; celui-ci favorise à son tour le dessèchement sur pied, qui est une raison supplémentaire pour que les animaux le refusent.

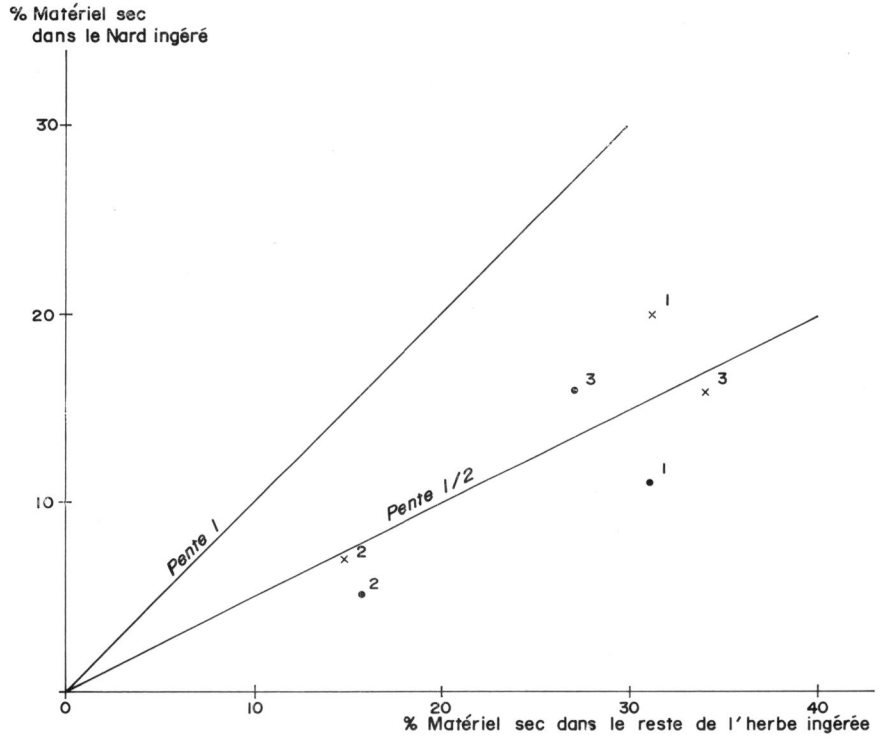


FIG. 4. — *Relation entre la proportion de matériel sec dans le Nard ingéré et dans le reste du fourrage récolté par les brebis*

● : charge forte × : charge faible 1 : numéro du cycle (1973)

DISCUSSION DES CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES

1. — *Évolution de la composition botanique*

En deux ans, la composition botanique de la Nardaie n'a pas évolué. En effet, l'acceptabilité du Nard n'augmente pas lorsque la charge passe de 5 à 10 brebis à l'hectare, et dans ces conditions, les touffes de refus gardent la suprématie dans la

compétition pour la lumière. Nous poursuivons actuellement l'expérience afin de connaître les conséquences d'une diminution supplémentaire des possibilités quantitatives de choix due au phénomène de nettoyage. L'acceptabilité du Nard peut soit augmenter, soit rester faible, avec, dans ce dernier cas, un danger de surpâturage des meilleures espèces.

A notre avis, la perpétuation des refus ne permet pas d'escompter d'amélioration à brève échéance. Les seuls changements éventuels de la composition botanique ne peuvent se produire qu'à long terme, et sous l'action d'un effet animal différent de l'effet sélection alimentaire : le recyclage accéléré de l'azote et des minéraux par l'intermédiaire des excrétats (FLOATE, 1970). Dans ce cas, l'instauration d'une compétition avantageuse pour les espèces productives deviendrait possible, d'abord au niveau du sol, et par la suite, au niveau des parties aériennes.

Une éradication rapide exigerait des méthodes plus radicales et plus coûteuses en matériel ou en main d'œuvre : l'emploi de très fortes charges instantanées ou du parcage (HABOVSTIAK, 1970) agirait par un effet de piétinement plus accentué; la fauche des refus diminuerait la compétition pour la lumière et mettrait à égalité les espèces devant l'effet coupe ; de fortes fertilisations augmenteraient le pouvoir compétitif des espèces plus productives (CHADWICK, 1960); il serait aussi possible d'employer des animaux à mâchoires plus larges et par conséquent moins sélectifs (bovins, équins).

2. — *Notion de valeur pastorale*

Les pastoralistes (ELLENBERG, 1952 ; KLAPP, 1965 *b*; VIVIER 1971 ; DAGET et POISSONET, 1972) ont proposé différentes formules permettant de calculer un indice de valeur pastorale des formations pâturées sur la base de la composition botanique. Toutes reviennent à sommer pour l'ensemble des espèces présentes, les $VS_i \times IS_i$, où VS_i (volume spécifique de l'espèce i) représente le pourcentage de l'espèce i dans le tapis végétal et IS_i (indice spécifique), une note attribuée empiriquement (DAGET et POISSONET, 1971) à l'espèce considérée. Cette notation prête à discussion : en effet, les auteurs qui ont établi des listes d'indice pondèrent dans un seul chiffre les critères de productivité, de valeur fourragère et d'acceptabilité.

La formule de l'indice de valeur pastorale est donc :

$$VP = \sum_i VS_i \cdot IS_i$$

Nous pouvons comparer cette formulation à une expression objective de la valeur alimentaire du fourrage choisi par l'animal sur le même pâturage. Selon DEMARQUILLY, on a pour un fourrage homogène :

$$VA = QI \cdot VF$$

Par extension, la valeur alimentaire d'un fourrage plurispécifique choisi au pré sera :

$$VA = \sum_i QI_i \cdot VF_i$$

Comme $QI_i = QI \cdot CS_i$, et $CS_i = AS_i \cdot VS_i$, on obtient l'expression finale

$$VA = QI \sum_i VS_i \cdot AS_i \cdot VF_i,$$

ou plus simplement :

$$VA = QI \cdot \overline{VF} \ (^1)$$

Par conséquent, la valeur alimentaire d'un pâturage pour un herbivore est le produit des quantités ingérées par la valeur fourragère moyenne du fourrage ingéré. Cette dernière est égale à la somme des produits spécifiques de trois termes relatifs à l'espèce : l'abondance dans la végétation, l'acceptabilité et la valeur fourragère.

Contrairement à l'indice de valeur pastorale, cette expression objective de la valeur d'un peuplement de composition botanique donnée n'est pas forcément constante : nous montrons ici que le terme AS_i peut varier selon la conduite du troupeau. Nous poursuivons actuellement l'étude de la valeur alimentaire de la Nardaie par la mesure des termes QI et $\overline{VF}$ sous différentes charges en animaux. Il semble dès à présent que l'énergie tirée par les herbivores d'un peuplement végétal donné ne soit pas déterminée par la seule composition botanique mais aussi par le système de pâturage.

CONCLUSION

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une pelouse où les animaux disposent de quantités d'herbe très supérieures à leurs besoins ne laisse pas forcément s'exprimer à plein les préférences intrinsèques des animaux : la liberté de choix n'est jamais entière et la sélection au pâturage s'exerce à l'intérieur de certaines limites qualitatives et quantitatives modifiables par la conduite du troupeau.

Sur un peuplement végétal de composition botanique donnée, le choix imposé par le système de pâturage détermine d'une part la valeur énergétique immédiatement exploitée, d'autre part l'évolution de la végétation qui peut être restructurée par la pâture et modifiée dans son aptitude à la sélection.

Reçu pour publication en février 1975.

REMERCIEMENTS

C'est grâce à un financement de la D. G. R. S. T. que ce travail d'équipe a été réalisé dans le cadre d'un programme « équilibres biologiques — pâturages d'altitude du Massif Central ».

Nous remercions particulièrement notre collègue chercheur M. THERIEZ qui a introduit dans le dispositif expérimental la technique des fistules œsophagiennes sur brebis, ainsi que G. MOLENAT, J. LEFAIVRE et P. DACHEUX, respectivement responsables du protocole zootechnique, des opérations chirurgicales et des soins aux brebis.

Nous remercions aussi les personnes qui nous ont guidés dans la rédaction de cet article : L. GACHON et F. X. de MONTARD pour la partie agronomique, R. JARRIGE pour la partie zootechnique.

(1) QI = quantités totales ingérées/ha ; QI_i = quantités ingérées de l'espèce i/ha ; AS_i = acceptabilité de l'espèce i ; VF_i = valeur fourragère de l'espèce i ; CS_i = contribution spécifique de l'espèce i dans le bol alimentaire ; VS_i = volume spécifique de l'espèce i dans le tapis végétal ; $\overline{VF}$ = valeur fourragère moyenne du bol alimentaire.

SUMMARY

AGRONOMIC IMPLICATIONS OF THE ALIMENTARY SELECTION EXERCISED BY SHEEP ON THE CONSTITUENTS OF A GRAZING-PASTURE VEGETATION

For two successive years, the botanical composition of a mountain sward with *Nardus stricta* is compared with the composition of the diet collected by sheeps. The sward is cultivated as rotating pasture according to two stocking rates. The diets are collected from sheep fitted with oesophagal fistulas and analysed by counting the species present on the points of a tray.

The acceptability of the various categories of fodder is defined as the relation : percentage in the diet/percentage in the vegetation (table 4). The sheep's refusal of *Nardus stricta* and dry grass and preference for the fine-leaved graminaceae (*Festuca rubra, Festuca duriuscula, Deschampsia flexuosa*) is shown. But they are not constant : they vary with respect to the relation : quantities offered/requirements, season and the number of previous cultivations. It is concluded that the cultivation method partly determines vegetation structure and selection by the animal without necessarily altering the botanical composition.

ZUSAMMENFASSUNG

LANDWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN AUF DIE KOMPONENTEN EINER WEIDEVEGETATION DURCH NAHRUNGSAUSLESE DER SCHAFE

Während zwei aufeinanderfolgenden Jahren wurde die botanische Zusammensetzung eines Bergweiderasens mit *Nardus stricta* mit der Zusammensetzung der durch die Schafe aufgenommenen Nahrung verglichen. Der Weiderasen wird als Rotationsweide mit zwei verschiedenen Besatzdichten genutzt. Die Nahrungsproben werden von den Schafen mittels einer Speiseröhre-Fistel gewonnen und nach einer speziellen Auszählmethode analysiert.

Die Annahme der verschiedenen Futterkategorien wird definiert als das Verhältnis von Anteil in der Nahrungsprobe zu Anteil in der Vegetation (tabelle 4). Diese zeigt die Verweigerung von *Nardus stricta* und die Bevorzugung von feinen Gräsern (*Festuca rubra, Festuca duriuscula, Deschampsia flexuosa*) durch die Schafe. Sie ist jedoch nicht konstant, sondern schwankt als Funktion des Verhältnisses Angebotene Menge/Bedürfnis, der Jahreszeit und der Anzahl vorgängiger Weidenutzungen. Daraus wird gefolgert, dass die Art der Nutzung teilweise den Aufbau des Pflanzenbestandes und die Auswahl durch das Tier bestimmt.

РЕЗЮМЕ

Агрономические последствия пищевой селекции производимой овцами в растительных составных пастбища.

Н. ЛУАЗО, Г. БЕШЕ

Ботанический состав горного пастбища на базе *Nardus stricta* сравнивался в течении двух последовательных лет с составом корма, найденного в пищеводе пасущихся овец. Пастбище использовалось ротационным порядком, с двумя уровнями нагрузки. С'еденный корм собирался в пище-

воде овец, снабженном фистулой и содержимое каждой чашки этого корма, высыпанного на решетку, анализировалось по видам трав найденных на решетке. Приемлемость различных категорий корма определялась как соотношение процента видов найденных в чашке, к проценту видов растительности на пастбище (таблица 4). Опыт показал отказ овец от *Nardus stricta* и от сухой травы, и их предпочтение к тонколистным злаковым (*Festuca rubra, Festuca duriuscula, Deschampsia flexuosa*). Но, предпочтение это не постоянно и изменяется в зависимости от сезонного соотношения « предлагаемые количества/нужды », и от количества уже проведенных скармливаний. Выводится заключение, что если способ эксплуатации пастбища частично предопределяет структуру растительности и селекцию животными, он не обязательно изменяет ботанический состав этого пастбища.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOLD G. W., MCMANUS W. R., BUSH I. G., BALL J., 1964. The use ot sheep fitted with oesophageal fistulas to measure diet quality. *Aust. J. exp. Agric. Anim. Husb.*, **4**, 71-79.

ARNOLD G. W., BALL J., MCMANUS W. R., BUSH I. G., 1966. Studies on the diet of the grazing animal. I. Seasonal changes in the diet of sheep grazing on pastures of different availability and composition. *Aust. J. Agric. Res.*, **17**, 543-556.

ARNOLD G. W., 1966. The special senses in grazing habits in sheep. *Aust. J. Agric. Res.*, **17**, 531-542.

BRYNMOR T., FAIRBAIRN C. B., 1956. The white bent ; its composition, digestibility and possible nutritive value. *J. Brit. Grassld. Soc.*, **11**, 230-234.

BUCHANAN H., LYCOCK W. A., PRICE D. A., 1972. Botanical composition and nutritive value of the summer diet of sheep on a tall forb range in southern Montana. *J. Anim. Sc.*, **35**, 423-430.

CHADWICK M. J., 1960. *Nardus stricta* L. *J. Ecol.*, **48**, 255-267.

DAGET P., POISSONET J., 1971 *a*. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. *Ann. agron.*, **22**, 5-41.

DAGET P., POISSONET J., 1971 *b*. De la structure de la végétation à sa qualité et à sa production dans les pâturages. 17 p., *Comm. Féd. Europ. des Herbages*, juin 1971.

DAGET P., POISSONET J., 1972. Un procédé d'estimation de la valeur pastorale des pâturages. *Fourrages*, **49**, 31-40.

DEMARQUILLY C., 1968. Variation de la valeur agronomique des fourrages verts. *Bull. Tech. Inform.*, 27-37.

DEMARQUILLY C., WEISS P., 1970. Valeur alimentaire des fourrages verts. *Fourrages*, **42**, 3-22.

DEMARQUILLY C., JARRIGE R., 1971. Digestibilité et quantités ingérées des fourrages des prairies naturelles et artificielles. *Rapport 4e Congrès Féd. Europ. des Herbages.*

ELLENBERG H., 1952. *Wiesen und Weiden und ihre standortliche Bewertung*, 143 p., Ulmer-Stuttgart.

FLOATE M. J. S., 1970. Decomposition of organic materials from hill soils and pastures. II. Comparative studies on the mineralisation of CNP from plant material and sheep faeces. *Soil Biol. Biochim.*, **2**, 173-185.

GARNER F. H., 1963. The palatability of herbage plants. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **18**, 79-89.

GODRON M., POISSONET J., POISSONET P., 1967. *Méthodes d'étude des formations herbacées denses. Essai d'application à l'étude du dynamisme de la végétation.* 28 p., C. E. P. E., doc. nº 35, Montpellier.

GORDON J. G., 1970. Food selection by ruminants. *Proc. Nutrit. Soc.*, **29**, 325.

GOUNOT M., 1969. *Méthodes d'études quantitatives de la végétation*, 5-30, Masson, Paris.

HABOVSTIAK J., 1970. Amendment of Nardus stricta dominant pastures by sheep folding and resowing. *Proc. XV th. Int. Grassl. Cong.*, 643.

HARKER K. W., TORREL D. T., VAN DYNE G. M., 1964. Botanical examination of forage from oesophageal fistulas in cattle. *J. Anim. Sci.*, **23**, 465-469.

HEADY H. F., TORELL O. T., 1959. Forage preference exhibited by sheep with oesophageal fistulas. *J. Range Man.*, **12**, 28-34.

HURLEY (Station de), 1961. Research techniques in use at the grassland Research Institute Hurley. Bull. 45, *Comm. Bureau of pastures and field crops*, 39.

HUNTER R. F., 1954. The grazing of hill pasture. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **8**, 195-208.

HUNTER R. F., 1960. Grazing behaviour. *Grass Cong.*, 454.

IVINS J. D., 1952. The relative palatability of herbage plants. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **7**, 43-54.

IVINS J. D., 1969. Exploitation efficace des herbages. *Span*, **12**, 145-147.

KERGUELEN M., 1972. (Communication personnelle).

KLAPP E., 1950. Borstgrasheiden der Mittelgebirge. *Z. Acker u. Pflanzenbau*, **93**, 400-444.

KLAPP E., 1965. *Grünland Vegetation und Standort. a*) 27-35. *b*) 348-364 et 113-114. Parey, Berlin.

MALECHEK J. C., LEINWEBER C. L., 1972. Forage selectivity by goats on lightly and heavily grazed ranges. *J. Range Man.*, **2**, 105-111.

MCCLYMONT G. L., 1968. Selectivity and intake in the grazing ruminant. *Handbook of Physiology*. Sec 6, vol. 1, 129-137, W. Heidel ed., American Physiological Soc., Washington.

MCMANUS W. R. *et al.*, ARNOLD G. W., HAMILTON F. J., 1962. Improved techniques in oesophageal fistulation of sheep. *Aust. Vet. J.*, **38**, 275-281.

MONTARD F. X. (de), GACHON L., 1972. Contribution à l'étude de la composition botanique et de la production des pâturages en relation avec le système d'exploitation de l'étage montagnard en Auvergne. *9e Congrès Groupe FAO des pâturages de montagne*. Brasov, 13 p.

MOTT G. O., 1960. Grazing pressure and measurement of pasture production. *Proc. VIII th. Grassl. Cong.*, 606.

POISSONET P., POISSONET J., 1969. *Étude comparée de diverses méthodes d'analyse de la végétation des formations herbacées denses et permanentes*. C. E. P. E., document nº 50, 119 p. Montpellier.

TORELL D. T., 1954. An oesophageal fistula for animal nutrition studies. *J. Anim. Sc.*, **13**, 878-884.

TURCEK F. J., SUSLIK V., 1971. Une année d'expérimentation sur la décomposition du Nard dans son environnement naturel. *Biologia Bratislava*, **26**, 541-547.

ULYATT M. J., 1973. The feeding value of herbage. In *Chemistry and Biochemistry of Herbage*. Acad. Press. London, **3**, 131-174.

VAN DYNE G. M., HEADY H. F., 1965. Botanical composition of sheep and cattle diets on a mature annual range. *Hilgardia*, **36**, 465-490.

VAN DYNE G. M., TORELL D. T., 1964. Development and use of the oesophageal fistulas ; a review. *J. Range Man.*, **17** (1) 7-19.

VIVIER M., 1971. L'interprétation agronomique des inventaires botaniques des prairies permanentes à l'aide des grilles floristiques et des indices spécifiques. *Fourrages*, **48**, 45-55.

VOISIN A., 1957. *Productivité de l'herbe*. Flammarion, Paris, 144-145.

YOUNG P. T., GREEN, 1968. Palatibility : The hedonic response to foodstuffs. *Handbook of physiology*, sec. 6, vol. 1, 353-366. W. Heidel éd., American Physiological Soc., Washington.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 309-322.

MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE DE MESURE *IN VIVO* DE L'ACTIVITÉ DE LA NITRATE RÉDUCTASE

POSSIBILITÉS D'APPLICATIONS AGRONOMIQUES EN MATIÈRE DE DIAGNOSTIC

Anne Marie BLONDEL et Denise BLANC

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches d'Antibes, I. N. R. A.,
06602 Antibes

RÉSUMÉ

L'étude des facteurs susceptibles d'intervenir dans la mesure de l'activité *in vivo* de la nitrate réductase de fragments de feuilles a conduit à définir les conditions expérimentales qui améliorent très nettement la précision des résultats. Elle a permis de confirmer l'intérêt de ce test rapide pour le diagnostic de la carence en molybdène. Les notions d'activité nitrate réductase (ANR) instantanée et potentielle sont précisées : leur intérêt dans l'appréciation du niveau optimum de la fertilisation azotée en fonction des besoins de la plante et des conditions de milieu ambiant est souligné.

INTRODUCTION

L'activité de la nitrate réductase (ANR) est généralement estimée *in vitro* par la méthode classique de mesure de l'activité d'un extrait enzymatique, méthode proposée par EVANS et NASON (1953) : le surnageant, purifié ou non, d'un broyat de tissus frais, centrifugé en milieu tamponné contenant des substances chimiques protectrices de l'enzyme, est mis en contact, pendant un temps déterminé, avec le substrat NO_3^- et des nucléotides réduits. L'ANR est mesurée par la quantité de nitrites apparus dans le milieu (µg de NO_2 par gramme de matière fraîche et par heure). La composition du milieu d'extraction, la purification de l'extrait brut, les conditions d'incubation varient selon les auteurs, en fonction des espèces (CHAMPIGNY, 1963 ; CROY et HAGEMAN, 1970 ; HAGEMAN et FLESHER, 1960 ; SANDERSON et COCKING, 1964 ; WALLACE et PATE, 1965) et des organes étudiés. Cette méthode est

longue, délicate et nécessite de nombreuses manipulations à basse température afin de conserver l'activité de l'enzyme isolée de son contexte cellulaire naturel protecteur. En outre, des difficultés d'extraction ont été signalées chez certaines espèces riches en composés phénoliques (BILAL et RAINS, 1973 ; KLEPPER et HAGEMAN, 1969).

En 1959, MULDER *et al.* mettent en évidence que le broyage des cellules inactive partiellement la nitrate réductase et proposent en conséquence une méthode de dosage *in vivo* de l'activité de l'enzyme. Des fragments de feuilles sont immergés en conditions anaérobies (on chasse l'oxygène des tissus car il peut entrer en compétition avec NO_3 pour les nucléotides réduits) dans une solution tampon phosphate contenant des nitrates et de l'acide malique comme source de nucléotides réduits. La quantité de nitrites diffusés dans ce milieu d'incubation sert de mesure de l'activité de la nitrate réductase de la plante.

La nitrate réductase est la première enzyme de la chaîne de réduction des NO_3 :

$$NO_3 \xrightarrow[\text{réductase}]{\text{nitrate}} NO_2 \xrightarrow[\text{réductase}]{\text{nitrite}} NH_2OH \xrightarrow[\text{réductase}]{\text{hydroxylamine}} NH_3$$

Le principe même de la méthode proposée implique le blocage de la réaction au stade NO_2, c'est-à-dire l'inhibition de la nitrite réductase, et suppose par ailleurs une diffusion complète et rapide des nitrites vers le milieu d'incubation. BAR AKIVA et STERNBAUM (1965) puis BAR AKIVA (1968, 1970) reprennent la même technique mais ils démontrent la supériorité du tampon *Tris* sur le tampon phosphate, l'inutilité d'une source de nucléotides réduits et la nécessité de réaliser l'incubation à l'obscurité afin de limiter la réduction importante de NO_2. La lumière n'agit qu'indirectement sur la nitrate réductase en fournissant NADPH photosynthétiquement, or la respiration fournit NADH qui peut être utilisé pour la réduction. Elle est par contre indispensable à la réduction des nitrites qui utilisent la ferrédoxine réduite, régénérée à la lumière dans les chloroplastes ou l'acide ascorbique dont la biogenèse a lieu à la lumière.

Simultanément, d'autres chercheurs comme RANDALL (1969) utilisent la technique initiale de MULDER *et al.* (1959), légèrement modifiée : il n'y a pas de source de nucléotides réduits dans le milieu et la réaction s'effectue à l'obscurité. FERRARI et VARNER (1970) démontrent que l'éthanol, substance oxydable, ajouté dans le milieu, pourrait agir directement ou indirectement sur la réduction des NO_3. Ils considèrent également que le tampon phosphate utilisé pour maintenir constant le pH optimal de la réaction jouerait aussi un rôle en tant qu'ion phosphate sur la régénération du NADH ou directement sur l'enzyme. Cette méthode est reprise par YODER et SHEFFER (1973).

JAWORSKI (1971) prouve que le propanol peut remplacer l'action du vide en augmentant la perméabilité des cellules ce qui permet une pénétration plus facile de NO_3 dans les cellules et une exodiffusion des nitrites dans le milieu. L'effet résulte aussi d'une rapide imbibition des tissus créant une situation anaérobie dans les cellules. Cette méthode est utilisée par KNYPL (1973) et DYKSTRA (1974). STEWART *et al.* (1973), RADIN (1974) et WALLACE (1973) utilisent également le propanol mais en condition anaérobie.

De leur côté, KLEPPER *et al.* (1971), HARPER et HAGEMAN (1972), SCHOLL *et al.*

(1974) réutilisent la méthode de MULDER *et al.* (1959) en supprimant la source de nucléotides réduits. TINGEY *et al.* (1974) introduisent un mouillant et du propanol dans cette technique. ECK et HAGEMAN (1974) remplacent le tampon phosphate par le tampon *Tris* et ajoutent au milieu du fructose 1-6 PP comme source de nucléotides réduits.

Ces différents chercheurs ont utilisé cette méthode à des fins diverses, et introduit des modifications quant à la nature du milieu d'incubation et à la technique d'inhibition de la nitrite réductase. Par contre, peu de recherches ont été entreprises sur les facteurs susceptibles d'intervenir au niveau de l'exodiffusion des nitrites, tels que la mouillabilité du matériel végétal, la taille des fragments de feuilles, ou la concentration saline du milieu d'incubation. De même, l'addition de nitrates comme substrat dans le milieu d'incubation est variable et ne tient pas compte de la présence éventuelle d'ions nitriques dans la plante : l'importance respective des nitrates endogènes et des nitrates exogènes sur l'activité mesurée mérite d'être précisée. C'est sur ces différents points que nous avons plus particulièrement porté notre attention dans le but d'améliorer le test de mesure utilisé jusque-là. Les études poursuivies dans ce sens nous ont permis de normaliser les conditions expérimentales de la détermination de l'ANR et d'envisager, en outre, les possibilités d'application agronomique de ce test dans le domaine du diagnostic.

ÉTUDE DE DIFFÉRENTS FACTEURS SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR DANS LA MESURE *IN VIVO* DE L'ACTIVITÉ DE LA NITRATE RÉDUCTASE (ANR)

Le protocole que nous avons utilisé à l'origine de cette étude, pour la mesure *in vivo* de l'ANR est celui proposé par BAR AKIVA (1968) : des fragments de feuilles sont mis à incuber à 31°C et à l'obscurité, dans 4 ml d'une solution contenant :

Tampon *Tris* 0,05M, HCl 1,5N, pH 7,4 (1 ml)
Eau (2 ou 3 ml)
KNO_3 0,5M (1 ou 0 ml).

Après un temps défini, on arrête la réaction en retirant les fragments du milieu d'incubation dans lequel les nitrites sont dosés par addition de sulfanilamide à 1 p. 100 dans HCl 1,5N puis de chlorhydrate de N 1-naphtyléthylène diamine à 0,02 p. 100 (SNELL et SNELL, 1949). La densité optique du complexe coloré est mesurée à 540 nm.

La détermination des teneurs en nitrates est effectuée par ionométrie (MAZOYER, 1972) sur l'extrait aqueux de la poudre sèche des feuilles.

1. — *Mouillance du milieu d'incubation*

La condition première de la diffusion des nitrites dans le milieu d'incubation est la parfaite adhérence du liquide à la surface de la feuille, or les premiers essais d'incubation conduits sur graminées fourragères dans un milieu ne contenant que le tampon *Tris* avec ou sans nitrate, ont mis en évidence la mauvaise mouillabilité du matériel végétal étudié, se traduisant par des résultats très hétérogènes. L'addi-

tion d'un mouillant au milieu d'incubation a été envisagée. Le Tween 80 (monooléate de polyoxyéthylène sorbitan), introduit à différentes concentrations dans le milieu d'incubation, ce qui augmente de façon considérable la quantité de nitrites apparus dans le milieu, a permis d'améliorer sensiblement la reproductibilité des résultats.

TABLEAU I

Influence de l'addition d'un mouillant sur l'ANR mesurée

Tween 80 dans le milieu d'incubation (%)	ANR (µg NO_2 formés par g de matière fraîche et par heure)
0	17,3 ± 8,0
0,05	34,9 ± 9,3
0,5	55,1 ± 7,7
5,0	60,9 ± 6,6

L'augmentation observée (tabl. 1) doit être attribuée non seulement à une meilleure diffusion favorisée par un contact plus étroit de la solution avec la feuille, mais également, aux conditions d'anaérobiose induites par le film continu de solution à la surface du matériel végétal.

Compte tenu des résultats obtenus, l'addition de Tween 80 à la concentration finale de 0,5 p. 100 dans la solution d'incubation, a été définitivement retenue.

2. — *Fragmentation de l'échantillon*

Il importait de préciser, dans un premier temps, le siège de la diffusion, et d'apprécier l'importance relative, au niveau du processus mesuré, de la surface intacte de la feuille et des lésions provoquées par le fractionnement de l'échantillon.

Un essai préliminaire nous a permis d'observer que des extrémités de feuilles de graminées mises en incubation ne laissent diffuser aucun nitrite si la section est maintenue hors du milieu liquide. Par contre, des nitrites apparaissent si la section est immergée. Dès lors, l'importance du fractionnement de l'échantillon apparaît primordiale. Nous l'avons appréciée en comparant, pour un poids donné de matériel végétal, la diffusion des nitrites à partir de fragments de 20, 10, 5 et 2 mm (tabl. 2).

TABLEAU 2

Influence de la taille des fragments sur l'ANR mesurée

Taille des fragments (mm)	ANR (µg NO_2 formés par g de matière fraîche et par heure)
20	36,5 ± 7,7
10	62,7 ± 10,8
5	70,2 ± 8,6
2	91,6 ± 4,2

La quantité de nitrites dosés augmente quand la taille des fragments diminue, ou encore, quand le nombre de coupures augmente.

La diminution de la taille des fragments favorise la diffusion des nitrites à partir d'un nombre plus élevé de cellules. Les fragments de 2 mm assurent une meilleure diffusion et permettent d'obtenir des résultats plus homogènes. Néanmoins, pour des raisons de rapidité d'échantillonnage, indispensable quand on veut apprécier une activité métabolique, nous avons choisi d'effectuer nos mesures sur des fragments de 5 mm qui permettent une sortie importante de nitrites avec une reproductibilité satisfaisante.

Dans ces conditions d'échantillonnage parfaitement définies, nous avons obtenu une relation linéaire entre la quantité de nitrites apparus dans le milieu d'incubation et le poids de la prise d'essai (fig. 1). L'ANR étant exprimée par gramme de matériel frais, il nous est possible d'adapter la prise d'essai à la nature du matériel étudié : d'une façon générale, nous travaillons sur 150 mg de matériel pour les jeunes feuilles et sur 250 mg pour les feuilles âgées (avec 2 ou 3 répétitions par mesure).

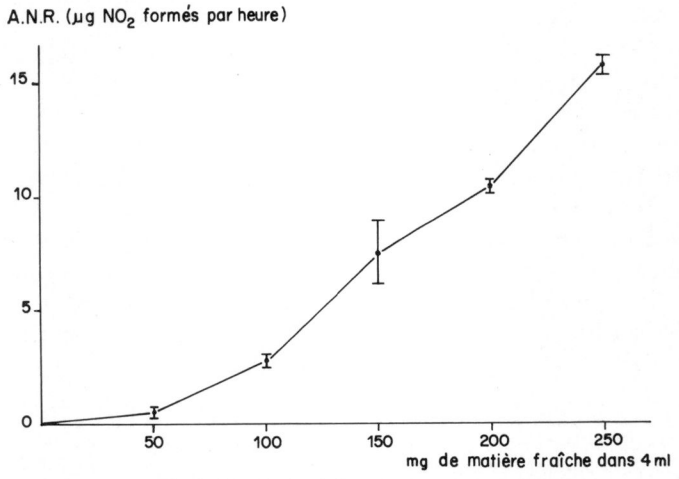


FIG. 1. — *Variation de l'activité nitrate réductase* (ANR) *en fonction du poids de la prise d'essai*

3. — *Concentration en sels du milieu d'incubation*

La détermination *in vivo* de l'ANR peut être envisagée avec ou sans addition de substrat (NO_3^-) dans le milieu d'incubation. Nous verrons ultérieurement l'intérêt que peut présenter cette possibilité dans le domaine du diagnostic. Néanmoins, l'addition de nitrates dans le milieu d'incubation modifie la concentration saline et peut intervenir de ce fait sur le processus de diffusion des nitrites. Afin de dissocier l'influence propre des ions (NO_3^-) de l'influence de la concentration saline, nous avons introduit dans le milieu d'incubation des sels de différentes natures (KCl, $CaCl_2$, $MgSO_4$) en quantités croissantes, et mesuré la quantité de nitrites diffusée dans le milieu sous ces conditions. Les résultats obtenus (fig. 2) mettent en évidence que l'augmentation de la concentration saline a, tout d'abord, un effet positif non négligeable sur la diffusion des nitrites. Cet effet est comparable pour les différents sels

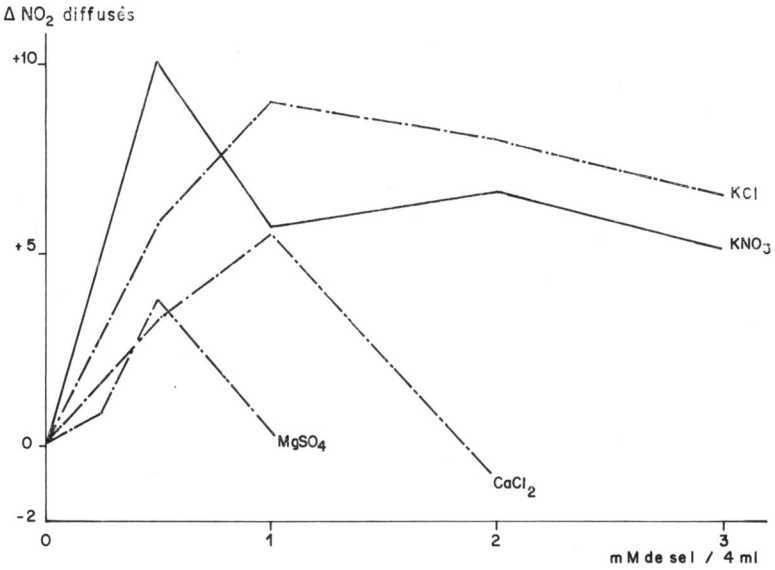


FIG. 2. — *Variation de la quantité de nitrites diffusée, en fonction de la concentration saline du milieu et de la nature du sel*

étudiés. A partir d'une concentration de l'ordre de 1 mM/4 ml de solution, on observe un effet dépressif dont l'importance varie avec la nature du sel.

Des résultats comparables sont obtenus en présence de nitrate de potassium : l'effet stimulant plus important à faible concentration doit être attribué, nous le verrons ultérieurement, à la présence d'ions NO_3^- dans le milieu d'incubation. L'effet inhibiteur important du nitrate de potassium à plus forte concentration a été confirmé lors de l'étude de la cinétique de la réaction (tabl. 3).

TABLEAU 3

Dynamique d'apparition de NO_2 (µg formés par g de matière fraîche) *en fonction de la concentration en KNO_3 du milieu d'incubation*

Durée d'incubation (heures)	Quantité de KNO_3 dans 4 ml de solution	
	0,5 mM	1 mM
1	39,3	26
2	141,2	88,6
3	270,4	151,8
4	471,5	200,0

Ces résultats nous amènent à conclure à la nécessité de conduire les mesures d'activité dans des milieux d'incubation d'égale concentration saline, le chlorure de potassium remplaçant le nitrate de potassium, lors des incubations dans des milieux dépourvus de nitrates.

4. — *Concentration en nitrates du matériel végétal*

La nitrate réductase est une enzyme inductible dont l'activité est sous la dépendance des ions nitriques présents dans le milieu. Lors de la mesure *in vivo* de l'ANR, les ions nitriques peuvent être apportés dans le milieu par le végétal lui-même (nitrates endogènes) ou introduits dans le milieu d'incubation (nitrates exogènes). Les nitrates endogènes sont au contact direct de l'enzyme, alors que les nitrates exogènes doivent pénétrer par diffusion dans la plante afin d'y être réduits ; de plus, l'apport externe de nitrates n'exclut pas la présence d'ions endogènes en quantité variable.

Il nous est apparu important de préciser l'influence de la concentration en nitrates du matériel étudié sur l'ANR, mesurée sans apport de nitrates dans le milieu d'incubation, et avec apport de nitrates externes.

Des essais ont été conduits sur cinq variétés de graminées fourragères : *Lolium perenne* L. var. Primevère, *Festuca pratensis* L. var. Naïade, *Dactylis glomerata* L. var. Floréal, var. Germinal, var. Prairial, cultivées en milieu artificiel et alimentées par des solutions nutritives composées de 4-6-10 ou 14 me/l de NO_3, 2 me/l de PO_4H_2, 1 me/l de SO_4, des cations K, Ca, Mg dans les proportions respectives de 30, 50 et 20 p. 100 et des oligoéléments en quantité suffisante.

Les observations ont porté sur des cultures d'hiver et sur des cultures de printemps. Sur ce matériel, nous avons simultanément déterminé la teneur en nitrates au moment du prélèvement, et mesuré l'ANR, le milieu d'incubation renfermant soit du nitrate de potassium, soit du chlorure de potassium en quantités équivalentes afin de placer les échantillons dans des conditions d'égale salinité.

4. 1. *Variations de l'ANR mesurée sans apport de nitrates dans le milieu d'incubation.*

Quelle que soit la saison, il existe une étroite corrélation entre l'ANR déterminée sans apport de nitrates complémentaires dans le milieu d'incubation et la teneur en nitrates du matériel végétal (fig. 3), pour l'ensemble des cinq variétés, et pour des teneurs normales en nitrates. Pour les traitements les plus riches en azote, les végétaux ont des teneurs très élevées en nitrates, et l'ANR tend vers un palier.

L'allure générale du phénomène est la même quelle que soit la saison, mais à égal niveau de nitrates dans le matériel végétal, l'ANR est supérieure au printemps.

Une même relation linéaire a été obtenue avec de jeunes plantules de blé cultivées sur des milieux liquides de concentration croissante en nitrates (fig. 4).

4. 2. *Variations de l'ANR mesurée avec apport de nitrates dans le milieu d'incubation.*

L'introduction de nitrates dans le milieu d'incubation a pour effet de supprimer la corrélation précédemment observée entre la teneur en nitrates du matériel végétal et l'activité de la nitrate réductase. Elle détermine une augmentation de l'ANR particulièrement sensible pour les faibles nutritions nitriques. Pour les végétaux déjà riches en nitrates, l'apport externe a peu d'influence et les activités mesurées avec et sans apport de nitrates dans le milieu d'incubation tendent vers la même valeur. A titre d'exemple, nous avons reporté dans le tableau 4 les résultats obtenus sur des cultures d'hiver et de printemps de *Festuca pratensis* L. var. naïade. Des résultats semblables ont été obtenus pour l'ensemble des clones soumis à l'expérimentation. L'influence de la saison se manifeste à des degrés variables suivant les variétés.

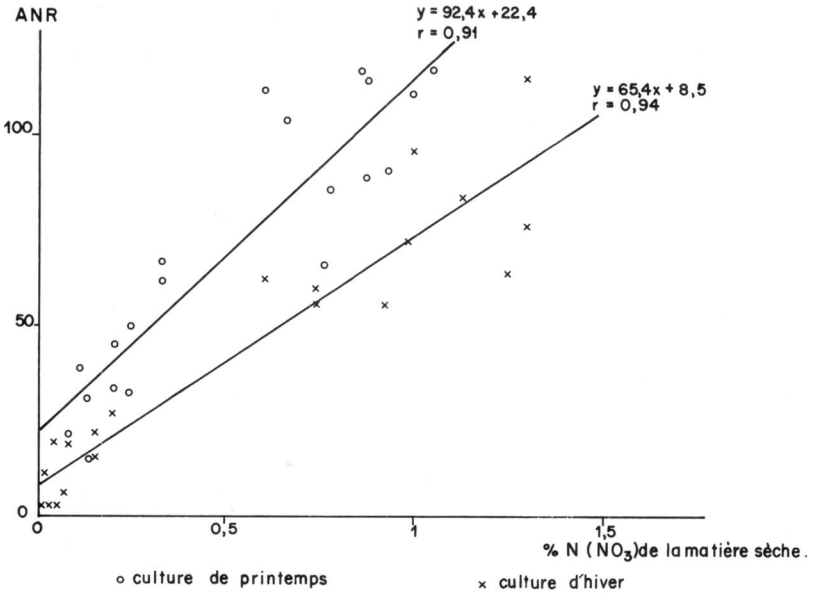


FIG. 3. — *Relation entre ANR et p. 100 N* (NO_3) *de la plante*

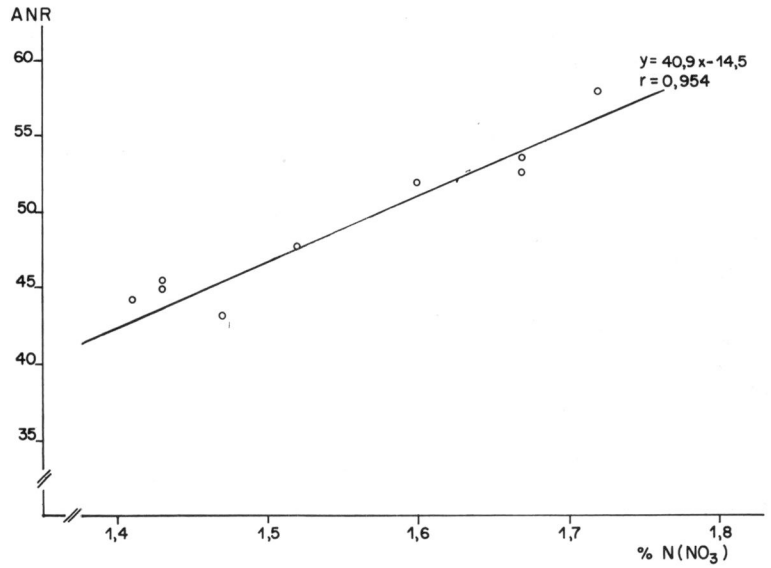


FIG. 4. — *Relation entre ANR et p. 100 N* (NO_3) *chez des plantules de blé*

TABLEAU 4

Variations de l'ANR et du rendement, en fonction de la nutrition nitrique pour Festuca pratensis *L. var. Naïade*

Teneur en NO_3 dans le milieu de culture en me/l	Hiver			Printemps		
	Rendement indiciaire (matière sèche)	ANR µg NO_2/g heure		Rendement indiciaire (matière sèche)	ANR µg NO_2/g heure	
		sans NO_3 externe	avec NO_3 externe		sans NO_3 externe	avec NO_3 externe
4	100	2,8	58,8	100	45,6	132,8
6	108	27,6	106,8	134	62,4	119,2
10	161	96,8	128,0	157	116,8	121,6
14	154	115,2	113,0	139	118,4	116,0

DISCUSSION DES RÉSULTATS

1. — *Proposition d'un test amélioré d'appréciation* in vivo *de l'ANR*

L'étude des différents facteurs envisagés a permis de préciser leur importance au niveau du processus étudié et nous a conduites à améliorer le test envisagé dans le sens d'une manifestation plus complète du phénomène et d'une meilleure reproductibilité des résultats.

Le protocole arrêté est le suivant :

La prise d'essai de 150 à 250 mg (selon l'âge des feuilles utilisées), réduite en fragments de 5 mm, est mise à incuber dans un milieu composé de :

Tampon *Tris* 0,05M, HCl 1,5N, pH 7,4 (1 ml),
Tween 80 à 2 p. 100 (1 ml),
Eau (1 ml),
KCl 0,5M ou KNO_3 0,5M (1 ml).

L'incubation est réalisée à l'obscurité et à 31°C pendant 4 heures.

— *Sensibilité et précision de la méthode.*

Pour le dosage des nitrites, la gamme étalon est établie pour des quantités variant de 0 à 10 microgrammes de NO_2 dans 5 ml de solution d'incubation. On peut considérer que la plus petite quantité de NO_2 que l'on peut détecter au spectrophotomètre Jean et Constant est de 0,2 microgramme, ce qui correspond à 2 p. 100 d'absorption. La méthode de dosage chimique a une précision très largement suffisante et les variations que l'on peut observer sont dues à l'hétérogénéité des échantillons végétaux utilisés.

Pour de très jeunes plantules, et pour une prise d'essai de 150 mg, le coefficient

de variation est de l'ordre de 3 à 7 p. 100. Pour des plantules plus âgées (2 mois de culture), l'échantillonnage est plus délicat : avec la même prise d'essai, le coefficient de variation était de l'ordre de 15 à 20 p. 100 ; nous sommes arrivés à le ramener à 8 p. 100 en augmentant la prise d'essai à 250 mg.

1. 1. *Comparaison des résultats obtenus par le test* in vivo *aux résultats obtenus par la méthode* in vitro *de l'extrait enzymatique.*

Cette comparaison a pour but d'apprécier la valeur du test proposé. Pour déterminer l'ANR par l'extrait enzymatique, nous avons retenu la méthode proposée par KLEPPER et HAGEMAN (1969), en y apportant les modifications proposées par CROY et HAGEMAN (1970). Le tampon d'extraction est composé de 50 mM de phosphate de potassium, 10 mM de cystéine, 5 mM d'EDTA par litre, le pH étant ajusté à 7,5 par une solution de potasse à 4 p. 100. Le milieu d'incubation est celui d'EVANS et NASON (1953), composé de 1 ml de NaOH (à 1 mg/ml), 0,5 ml de KNO_3 0,1M, 2,5 ml de tampon phosphate de potassium 0,1M, pH 7 et 1 ml de l'extrait enzymatique. La réaction dure 30 mn à 30°C ; elle est stoppée par les réactifs de dosage des nitrites qui sont déterminés par colorimétrie.

La comparaison a porté sur des échantillons de plantes cultivées en milieu artificiel à différents niveaux d'azote, en l'absence de tout autre facteur limitant. Dans ces conditions, les résultats obtenus par les deux méthodes sont en bonne corrélation ($y = 0{,}48\,x + 33{,}8$ avec $r = 0{,}82$ pour $n = 8$). L'activité mesurée par l'une ou l'autre n'est de toute façon qu'une valeur approchée de l'activité réelle.

1. 2. *Avantages de la méthode* in vivo.

Le test proposé est facile à mettre en œuvre, il ne nécessite pas d'équipement indispensable à l'extraction enzymatique, pour laquelle certaines opérations (broyage, centrifugation) doivent être effectuées à basse température. Il est simple et rapide : une seule personne peut effectuer en moyenne 150 déterminations par semaine. Les résultats sont reproductibles.

A ces avantages matériels, s'ajoute celui d'ordre méthodologique qui permet d'envisager son utilisation en agronomie dans le domaine du diagnostic.

2. — *Possibilités d'applications agronomiques du test* in vivo.

La détermination de l'activité enzymatique *in vitro* par extraction de l'enzyme, s'effectue en présence du substrat et du cofacteur enzymatique, l'un et l'autre étant introduits dans le milieu d'incubation. Le test *in vivo* se prête à une double détermination : une activité que nous appellerons « *ANR instantanée* » qui est mesurée dans les conditions naturelles du fragment foliaire au moment du prélèvement, sans addition de substrat externe. Une activité que nous appellerons « *ANR potentielle* » qui est déterminée en présence d'un apport externe de substrat (l'introduction du cofacteur pourrait également être envisagée).

Cette double détermination, complétée par la détermination des ions nitriques dans la feuille, au moment de la mesure, offre, dans le domaine du diagnostic, différentes possibilités d'applications qu'il nous a été donné d'expérimenter, l'une sur le terrain, l'autre au laboratoire.

2. 1. *ANR instantanée et teneur en nitrates.*

Nous avons mis en évidence une relation directe entre l'*ANR instantanée* et la teneur en nitrates du matériel végétal : à une teneur en nitrates élevée correspond très généralement une activité intense. Il en résulte que l'*ANR instantanée*, faible dans un végétal riche en nitrates, traduit l'existence d'un facteur limitant au niveau de l'ANR. Une carence en molybdène, élément indispensable à l'ANR, peut en particulier être envisagée : c'est à cette fin que BAR AKIVA (1968) a utilisé ce test. Nous avons nous-mêmes diagnostiqué par cette technique une carence en molybdène sur agrumes dans les sols d'alluvions anciennes de la côte orientale de la Corse ; les arbres sains et les arbres malades ne se différenciant pas par des teneurs essentiellement différentes en cet élément. Des pulvérisations de molybdène ont provoqué une augmentation d'ANR et une diminution de l'accumulation de nitrates et se sont avérées parfaitement efficaces sur le terrain (BLONDEL et BLANC, 1975).

2. 2. *ANR instantanée et ANR potentielle.*

Nous avons signalé antérieurement les variations respectives de l'*ANR instantanée et de l'ANR potentielle* avec l'intensité de la nutrition azotée fournie à la plante

L'ANR potentielle est indépendante du taux de nitrates dans les tissus, sauf dans le cas extrême d'un végétal très fortement carencé chez lequel elle est légèrement inhibée.

L'ANR instantanée est en relation directe avec la teneur en nitrates des tissus et tend, pour les teneurs très élevées, vers un palier qui se situe au voisinage de l'*ANR potentielle*.

On peut considérer que pour un niveau de nutrition azotée donné, la différence entre les deux ANR (Δ ANR) traduit un déficit d'utilisation du « potentiel nitrate réductase » de la plante. Ce déficit diminue lorsque l'intensité de la nutrition azotée augmente ; en comparant cette évolution avec l'évolution parallèle de l'efficience des apports d'azote complémentaires $\left(\frac{\Delta \text{ Rendement}}{\Delta N}\right)$, il nous a été possible, pour les deux séries d'essais, d'hiver et de printemps conduits à 4 niveaux d'azote sur les cinq variétés de graminées fourragères :

— d'une part de confirmer la corrélation positive qui lie ces deux valeurs :

$r = 0{,}683$ avec $n = 15$ pour la culture d'hiver,
$r = 0{,}602$ avec $n = 15$ pour la culture de printemps,

Δ ANR permet un diagnostic physiologique précoce de la fertilisation azotée ;

— d'autre part, de préciser la limite de la fertilisation sur la base d'un tel diagnostic. En effet pour ces deux essais, un apport d'azote supérieur à celui correspondant à un déficit d'ANR moyen de 35 p. 100 de l'*ANR potentielle* est excessif, l'efficience du supplément d'N s'annule puis devient négatif. Au maximum du rendement, l'activité de la nitrate réductase n'est ainsi exploitée qu'au 2/3 de son potentiel environ, ce qui correspond aux résultats de BAR AKIVA *et al.* (1970). Cette donnée n'a qu'une valeur expérimentale qui mérite d'être contrôlée par ailleurs.

Nous représentons figure 5 une schématisation de l'ensemble de ces résultats depuis l'état de carence jusqu'à celui d'excès.

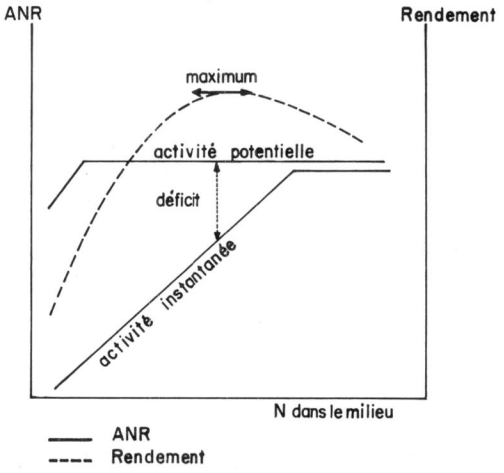


FIG. 5. — *Représentation schématique des variations du rendement, de l'ANR instantanée et de l'ANR potentielle, en fonction de l'intensité de la nutrition azotée*

CONCLUSIONS

Les améliorations apportées à la technique de mesure *in vivo* de l'ANR en font une méthode rapide, précise et reproductible, se prêtant facilement à l'exécution de l'analyse de série.

Les études poursuivies dans ce but nous ont permis de montrer l'intérêt de ce test dans le domaine du diagnostic. Il s'est révélé capable de déceler une carence en molybdène que les techniques analytiques habituelles n'avaient pu mettre en évidence. Son utilisation s'avère du plus haut intérêt pour rechercher le niveau optimum de la fertilisation azotée, en fonction de l'espèce et des conditions de milieu ambiant. Par rapport aux méthodes traditionnelles de diagnostic qui déterminent soit un état final (N total dans le cas du diagnostic foliaire), soit un niveau d'absorption et de transfert (NO_3 dans le cas du diagnostic pétiolaire), le test proposé présente l'avantage d'apprécier l'utilisation de l'azote nitrique absorbé au niveau de la première étape du métabolisme de l'azote.

Reçu pour publication en janvier 1975.

SUMMARY

AN IMPROVED PRODECURE FOR THE *IN VIVO* ASSAY OF NITRATE REDUCTASE ACTIVITY. POSSIBLE AGRONOMICAL USE IN DIAGNOSIS

The study of factors liable to come into play in the *in vivo* measurement of nitrate reductase activity of leaf fragments led to the defining of experimental conditions which very clearly improve the accuracy of results. It enabled the advantage of this quick test for molybdenum defi-

ciency diagnosis to be confirmed. The concepts of instantaneous and potential nitrate reductase activity (ANR) are specified : their advantage in estimating the optimum level of nitrogenous fertilization with respect to the plant requirements and the conditions of the surrounding medium is emphasized.

ZUSAMMENFASSUNG

AUSARBEITUNG EINER METHODE FÜR DIE MESSURG
DER NITRATREDÜKTASE AKTIVITÄT *IN VIVO*.
MÖGLICHE ANWENDUNGEN FÜR LANDWUTSCHAFTLICHEN DIAGNOSEN

Die Untersuchung der Parameter, die auf der Messung *in vivo* der Nitratredüktase Aktivität in Blätterstücken eintreten, führt zu den experimentellen Bedingungen, die die Genauigkeit der Resultaten deutlich verbessern. Die Bedeutung dieses kurzes Test für Diagnose des Molybdänmangels wird bestätigt. Die Begriffe der momentanen und potentiellen Nitratredüktase Aktivitäten (ANR) werden näher bestimmt : ihre Anteil für die Abschätzung der optimalen Stickstoffdüngunglibelle dem Pflanzenbedarf und Umgebungstand angemessene wird unterstrichen.

РЕЗЮМЕ

Разработка метода измерения *in vivo* нитрат-редуктазной активности. Возможности агрономического применения этого метода для диагностики.

АННА-МАРИА БЛОНДЕЛЬ, ДЕНИЗА БЛАН.

Изучение факторов необходимых при измерении нитрат-редуктазной активности фрагментов листьев, привело к уточнению условий значительно улучшающих точность результатов. Оно подтвердило интерес этого быстрого испытания для диагностики молибденовой недостаточности. Затем, понятия нитрат-редуктазной активности немедленного действия и потенциальной уточняются авторами и подчеркивается интерес этих понятий для определения, уровня азотного удобрения, в зависимости от нужд растения и от условий окружающей среды.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAR AKIVA A., STERNBAUM J., 1965. Possible use of the nitrate reductase activity of leaves as a measure of the nitrogen requirement of Citrus trees. *Plant Cell Physiol.*, **6**, 575-577.

BAR AKIVA A., 1968. *Investigation into new methods for assessing nutrient status* (*deficiences and excesses*) in *Citrus trees and other plants* (*biochemical approach*). Final Report of Research, Bet Dagan, Israel., 75 p.

BAR AKIVA A., SAGIV J., LESHEM J., 1970. Nitrate reductase activity as an indicator for assessing the nitrogen requirement of grass crops. *J. Sci. Fd. Agric.*, **21**, 405-407.

BILAL I. M., RAINS D. W., 1973. *In vivo* characterization of nitrate reductase activity in cotton. *Physiol. Plant*, **28**, 237-243.

BLONDEL A. M., BLANC D., 1975. Accidents végétatifs sur agrumes en Corse : mise en évidence d'une carence en molybdène par utilisation du test de mesure *in vivo* de l'activité de la nitrate réductase. *Ann. agron.*, **26** (3), 277-287.

CHAMPIGNY M. L., 1963. Sur l'activité et l'induction de la nitrate réductase dans les plantules de maïs. *Physiol. vég.*, **1**, 139-169.

CROY L. I., HAGEMAN R. H., 1970. Relationship of nitrate reductase activity to grain protein production in wheat. *Crop Sci.*, **10**, 280-285.

DYKSTRA G. F., 1974. Nitrate reductase activity and protein concentration of two *Populus* clones. *Plant Physiol.*, **53**, 632-634.

ECK H. V., HAGEMAN R. H., 1974. Nitrate reductase activity in sudangrass cultivars. *Crop Sci.*, **14**, 283-287.

EVANS H. J., NASON A., 1953. Pyridine nucleotide-nitrate reductase from extracts of higher plants. *Plant Physiol.*, **28**, 233-254.

FERRARI T. E., VARNER J. E., 1970. Control of nitrate reductase activity in barley aleurone layers. *Proc. Nation. Acad. Sci. U. S. A.*, **65**, 729-736.

HAGEMAN R. H., FLESHER D., 1960. Nitrate reductase activity in corn seedlings as affected by light and nitrate content of nutrient media. *Plant Physiol.*, **35**, 700-708.

HARPER J. E., HAGEMAN R. H., 1972. Canopy and seasonal profiles of nitrate reductase in soybeans. *Plant Physiol.*, **49**, 146-154.

JAWORSKI E. G., 1971. Nitrate reductase assay in intact plant tissues. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, **43**, 1274-1279.

KLEPPER L. A., HAGEMAN R. H., 1969. The occurrence of nitrate reductase in apple leaves. *Plant Physiol.*, **44**, 110-114.

KLEPPER L. A., FLESHER D., HAGEMAN R. H., 1971. Generation of reduced nicotinamide adenine dinucleotide for nitrate reduction in green leaves. *Plant Physiol.*, **48**, 580-590.

KNYPL J. S., 1973. Induction of nitrate reductase by chloramphenicol in detached cucumber cotyledons. *Planta* (Berl.), **114**, 311-321.

KNYPL J. S., 1973. Enhancement of nitrate reductase activity by N. N-dimethyl amino-succinamic acid in senescing kale leaf discs. *New Phytol.*, **72**, 1311-1314.

MAZOYER R., 1972. L'ionométrie : ses possibilités d'application au dosage de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal en agronomie. *Ann. agron.*, **23**, 673-684.

MULDER E. G., BOXMA R., VAN VEEN W. L., 1959. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissues. *Plant and Soil*, X, 335-355.

RADIN J. W., 1974. Distribution and development of nitrate reductase activity in germinating cotton seedlings. *Plant Physiol.*, **53**, 458-463.

RANDALL P. J., 1969. Changes in nitrate and nitrate reductase levels on restoration of molybdenum to molybdenum deficient plants. *Aust. J. Agr. Res.*, **20**, 635-642.

SANDERSON G. W., COCKING E. C., 1964. Enzymic assimilation of nitrate in tomato plants : reduction of nitrate to nitrite. *Plant Physiol.*, **39**, 416-422.

SCHOLL R. L., HARPER J. E., HAGEMAN R. H., 1974. Improvements of the nitrite color development in assays of nitrate reductase by phenazine methosulfate and zinc acetate. *Plant Physiol.*, **53**, 825-828.

SNELL F. D., SNELL C. T., 1949. *Colorimetric methods of analysis.* D. Van Nostrand Compagny Inc. New York, vol. II, 804-805.

STEWART G. R., LEE J. A., OREBAMJO T. O., 1973. Nitrogen metabolism of halophytes. II. Nitrate availability and utilization. *New Phytol.*, **72**, 539-546.

TINGEY D. T., FITES R. C., BEHARSJAH J., 1974. Factors influencing nitrate reduction in soybean foliage. *New Phytol.*, **73**, 21-29.

WALLACE W., PATE J. S., 1965. Nitrate reductase in the field pea *Pisum arvense* L. *Ann. Bot.*, **29**, 655-671.

WALLACE W., 1973. The distribution and characteristics of nitrate reductase and glutamate dehydrogenase in the maize seedlings. *Plant Physiol.*, **52**, 191-196.

YODER O. C., SCHEFFER R. P., 1973. Effect of *Helminthosporium carbonum* toxin on nitrate uptake and reduction by corn tissues. *Plant Physiol.*, **52**, 513-517.

Ann. agron., 1975, **26** (3), 323-325.

CHRONIQUE DES LIVRES

ARLERY (R.), GRISOLLET (H.), GUILMET (B.). — CLIMATOLOGIE. MÉTHODES ET PRATIQUES. — Monographies de la Météorologie Nationale. Gauthier Villars Éd., Paris, 1973, 16 × 25, 434 p., 2e édition revue et augmentée.

Ce livre constitue un guide complet pour qui se propose d'aborder l'étude du climat. Il expose les principaux problèmes qui se posent en climatologie et comment il convient de les résoudre.

La première partie de l'ouvrage décrit les fondements de la climatologie : définitions, facteurs du climat, éléments climatiques, les différents ordres du climat, les observations et leur traitement en vue d'obtention des données climatologiques (environ 80 pages).

La deuxième partie de l'ouvrage est consacrée au traitement statistique des données d'observation : classement et recensement, représentations graphiques, distributions de fréquences, corrélations, analyse des séries chronologiques. Cette partie capitale de l'ouvrage constitue à elle seule, une base très accessible et très complète de l'application du calcul statistique à la climatologie (200 p. environ).

La troisième partie traite les aspects de la climatologie appliquée, particulièrement la climatologie descriptive et la classification des climats, et cite succinctement certains aspects appliqués tels que l'action du climat sur la biologie, sur l'environnement, l'hydrologie, l'urbanisme... ainsi que l'action de l'homme sur le climat, mais ceci très brièvement, au titre d'exemples (100 p. environ).

Une bibliographie d'ouvrages généraux de climatologie fondamentale ou appliquée, ainsi que d'ouvrages de statistiques, une liste des principales revues de climatologie mondiales, un index matière et un index auteur complètent utilement ce livre.

La particularité intéressante de l'ouvrage réside dans sa présentation claire et complète du traitement statistique des données d'observations. C'est son mérite essentiel.

Ce livre intéressera tous les spécialistes en climatologie et en météorologie, mais aussi les ingénieurs et chercheurs en bioclimatologie, écologie, agronomie et hydrologie.

Ph. G.,
L. D.

SLAVIK (B.). — METHODS OF STUDYING PLANT WATER RELATIONS. — Ecological studies 9, JACOBS J. *et al* Ed., Academia, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague et Springer Verlag, Berlin, 1974, 449 p.

Ce neuvième volume de la Collection « Ecological Studies » constitue un excellent traité méthodologique, unique à notre connaissance, pour l'ensemble des études relatives aux relations hydriques des plantes.

Il présente à la fois un double avantage ; le premier est lié à son origine : la mise à la disposition d'un plus large public, d'un ouvrage en langue anglaise reprenant largement un précédent ouvrage rédigé par la majorité des mêmes auteurs, également sous la direction de B. SLAVIK, et publié en 1965, en langue tchèque, sous le même titre par Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences (Prague), ouvrage déjà fort intéressant et alléchant mais qui fut, hélas, de faible audience car peu accessible sur le plan linguistique! Cet inconvénient étant compensé, il faut souligner le second avantage résidant dans la refonte de l'ouvrage et son amélioration notable : il s'agit là d'un manuel fort clair, très complet et très bien présenté.

Les auteurs, fort modestement, en préface, énoncent leurs difficultés à remplir leur ambition et reconnaissent une certaine disparité d'informations, d'une méthode à l'autre, tellement il est difficile de rassembler, tout à la fois, une liste exhaustive des types de méthodes, suffisamment de détails sur la construction ou la mise en œuvre des appareillages, et une évaluation critique correcte. Leur propos est réellement modeste car l'effort fourni est considérable et les résultats

très informatifs ; nous reconnaissons l'effort pédagogique habituel de ces auteurs, notamment dans la présentation des conclusions sur les comparaisons, faite sous forme de tableaux, donnant gammes d'utilisation, limites d'emploi, matériel biologique utilisable, précision attendue, équipement nécessaire, références bibliographiques correspondantes. Là est l'avantage essentiel de l'ouvrage. Même des listes de fabricants sont parfois fournies, les auteurs n'ayant pas eu le scrupule de non-publicité, parfois regrettable quand il s'agit de travailler et de s'équiper !

Le livre commence par la nécessaire et difficile mise au point terminologique et symbolistique (10 p. environ), suivie d'un chapitre sur l'eau dans les cellules et les tissus (110 p. env.), la teneur en eau (30 p.), les échanges hydriques entre les racines et le sol, avec également les paramètres hydriques du sol (70 p.), les flux d'eau dans les plantes (15 p.), les échanges hydriques entre les plantes et l'atmosphère, incluant la transpiration et les stomates, l'humidité de l'air et le pouvoir évaporant, mais excluant les échanges globaux à l'échelle d'un champ et les mesures d'évapotranspiration (90 p.). Diverses annexes suivent, ainsi qu'une abondante bibliographie, des index auteur et matière. De nombreux schémas de principe ou de construction des appareillages, quelques photographies complètent utilement le texte.

Le livre s'adresse à un large public, du spécialiste à l'étudiant, de l'agronome à l'écologiste. Il remplit sa mission de rassemblement bibliographique et critique des méthodologies actuellement disponibles, de la plus simple aux plus raffinées.

L. D.

QUENEY (P.) 1974. — ÉLÉMENTS DE MÉTÉOROLOGIE. Collection de l'E. N. S. T. A., Paris, Masson Ed., 312 p.

Cet ouvrage, conçu dans un but pédagogique, constitue une synthèse des résultats les plus importants relatifs à l'atmosphère, y compris les plus récents.

Il expose l'enseignement actuel en Météorologie en vue du Certificat de Géophysique Externe, (Université Paris VI), complété d'informations de nature technique et de justifications de formules, et peut servir de base pour les candidats au D. E. A. de Météorologie.

Néanmoins, l'auteur a préféré ne pas développer certains sujets tels que la théorie des ondes atmosphériques, les théorèmes sur la circulation et le tourbillon, la prévision numérique du temps, ces sujets risquant d'être assez vite dépassés en raison des rapides progrès des géosciences. Il renvoie alors le lecteur aux ouvrages spécialisés indiqués dans la bibliographie, ou aux nombreux périodiques consacrés à la Géophysique ou à la Météorologie.

Le plan du livre se présente en 8 divisions :

1) Observations météorologiques courantes ;
2) Structure générale de l'atmosphère ;
3) Thermodynamique de l'atmosphère ;
4) Approximation hydrostatique ;
5) Phénomènes radiatifs ;
6) Hydrodynamique de l'atmosphère ;
7) Mouvements de petite et moyenne échelle ;
8) Mouvements de grande échelle.

Suivent une bibliographie et un index des auteurs et des matières.

L'usage de l'ouvrage est facilité par le rappel des lois classiques de physique ou d'hydrodynamique qui sont utilisées, avec les valeurs de constantes physiques actuellement adoptées et des graphiques ou tables numériques correspondantes.

Plus généralement, cet ouvrage est destiné à tous ceux dont l'activité a quelque rapport avec la science de l'atmosphère. Ingénieurs hydrographes ou océanographes, climatologues, géographes, agronomes, etc.

L'ouvrage est de bonne présentation, abondamment illustré, facile et agréable de manipulation ; il répond bien au but que se proposait l'auteur : offrir un manuel pédagogique à un très large public.

M. C. D.

LIETH (H.), 1974. — PHENOLOGY AND SEASONALITY MODELING. — Ecological Studies 8, JACOBS J. *et al.* Ed., Berlin, Springer-Verlag, 444 p.

Ce 8e volume de la Collection « Ecological Studies » reprend des travaux présentés au 25e Congrès annuel de l'A. I. B. S. (American Institute of Biological Sciences) à Minneapolis (Minnesota), en août 1972. Il est publié dans le cadre du Programme Biologique International par le Comité National des États-Unis.

Cet ouvrage présente une étude phénologique de modèles biologiques pour chaque saison et chaque niveau trophique, sur plusieurs continents.

Les rythmes saisonniers d'événements biologiques ou abiotiques sont discutés au sein du concept d'écosystème global. L'accent est mis sur la modélisation dans un but d'interprétation puis de prévision, notamment au moyen de calculateurs automatiques permettant à des traceurs l'établissement de cartes.

L'intérêt de cet ouvrage est d'autant plus grand qu'il existe peu de traités de phénologie. De plus, il a le mérite de poser les principes de base de la phénologie et de proposer des méthodologies, notamment prévisionnelles. Il traite des biomes (naturels) mais également de nombreux exemples de cultures alimentaires et industrielles.

On sait déjà modéliser, dans un but prévisionnel, de nombreuses variables biologiques en fonction des facteurs de l'environnement. De même, la phénologie se propose de modéliser les fonctionnements d'écosystèmes globaux en fonction de certains critères climatiques (par exemple des critères de réchauffement précoce, ou gelée tardive, ou année normale) et de donner des probabilités d'occurrence d'événements (ex : migrations animales, feuillaison,....). Les modèles phénologiques peuvent permettre d'expliquer et de prévoir la variabilité annuelle et interannuelle de différentes activités biologiques. Les études ponctuelles mais intensives du fonctionnement d'écosystèmes restreints permettront d'envisager l'extension à des problèmes régionaux, notamment en matière de limites climatiques de cultures.

Sous la direction de Helmut LIETH, Professeur de Botanique et d'Écologie à l'Université de North-Carolina, plus de 40 spécialistes ont collaboré à la réalisation de cet ouvrage. Les 32 articles qui le composent sont groupés en 6 sections :

1) Introduction à la Phénologie et modélisation du rythme saisonnier ;
2) Méthodes d'études phénologiques : réseaux d'observation ; parc phénologique ; télédétection multispectrale ; automatisation des tracés de cartes ; phénologie, photopériodisme et dormance des plantes.
3) Rythmes saisonniers à l'intérieur des niveaux trophiques ;
4) Études de biomes représentatifs ;
5) Modélisation en phénologie et rythme saisonnier ; modélisation mathématique des phases phénologiques avec tracés de cartes prévisionnelles, modélisation du cycle annuel de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration en fonction du concept d'unité thermique solaire ;
6) Applications de la phénologie à l'Agriculture : le réseau européen de parcs phénologiques, variabilité génétique des caractéristiques phénologiques des arbres forestiers, diffusion atmosphérique d'algues, de protozoaires, de champignons.

Chacun de ces articles comporte de nombreuses références bibliographiques. Enfin, l'ouvrage se termine par un index matière et un index des espèces citées dans le texte.

La présentation de ce livre est excellente, comme celle de tous les ouvrages de cette collection qui l'ont précédé.

L. D.
M. C. D.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Le Directeur de la publication: M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 11-1975

Dépôt légal: 4e trimestre 1975. N° d'impression: 1388

annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (4), 327-336.

ÉTUDE DE LA NUTRITION EN BORE DE L'ŒILLET AMÉRICAIN

Denise BLANC

avec la collaboration technique de Maryse MONTARONE, Irène AGIUS et Albine SORRENTINO

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale, I. N. R. A.,
Bd du Cap,
06602 Antibes

RÉSUMÉ

La présente étude a un triple objectif : préciser la sensibilité de l'œillet américain à une carence ou à une toxicité en bore, dégager des normes de composition en vue de la mise au point d'un test analytique de diagnostic et améliorer la fertilisation en bore des cultures en pleine terre.

Les auteurs étudient l'influence de l'apport de bore en quantités variables sur le rendement de la culture, sur la composition minérale des pousses axillaires et sur la répartition du bore dans les différentes parties de la plante.

Une teneur de 40 p.p.m. de bore dans les pousses axillaires en début de culture apparaît comme un seuil minimal, le taux optimal se situant aux environs de 50 p.p.m.

L'importance de la nutrition calcique sur les manifestations de carence et de toxicité en bore a conduit les auteurs à préciser un rapport optimal de Ca/B voisin de 360.

L'implantation, dans le Midi de la France, de cultures d'œillets américains sur des sols calcaires nouvellement défrichés et pauvres en matières organiques a posé le problème de la carence en bore jusque-là inconnue dans cette région, sur cette espèce. Des applications de bore se sont révélées indispensables dans ces cas particuliers, et les résultats spectaculaires enregistrés ont incité à la généralisation d'apports borés sur la plus grande partie des cultures, quelle que soit la richesse du sol en cet élément. Si les exportations de bore par l'œillet américain ont pu être chiffrées à 105 mg environ par m² pour une culture annuelle, les apports couramment effectués sont actuellement, par m², de l'ordre de 2 g de Boracine à la préparation du sol, et de deux compléments en cours de culture de 0,500 g de Solubor, ce qui correspond à un apport total de 460 mg de bore par m² et par an, soit plus de 4 fois les exportations.

Outre les accidents ponctuels de toxicité déjà enregistrés çà et là, des apports excédentaires de cette importance sur des sols ayant par ailleurs atteint des niveaux élevés en matières organiques, peuvent, à long terme, provoquer des accidents : soit que le bore retenu dans la couche arable atteigne un niveau toxique auquel l'œillet est particulièrement sensible, soit que son lessivage sous forme soluble détermine un enrichissement dangereux des nappes profondes.

Afin de pallier les inconvénients d'une fertilisation anarchique appliquée de façon uniforme à des types de sols extrêmement variés, il nous est apparu indispensable, dans un premier temps, d'étudier en milieu contrôlé, et sous les conditions du climat méditerranéen, la réaction de l'espèce à des doses variables de bore, dans le triple but :

— d'apprécier l'influence du bore sur le rendement de la culture,
— de préciser la distribution de cet élément dans les différentes parties de la plante,
— de fixer des normes de concentrations optimales dans le végétal afin de faciliter le diagnostic en cours de culture.

Par ailleurs, nous avons essayé de dégager l'influence éventuelle du bore sur l'équilibre ionique du matériel récolté, équilibre utilisé comme critère de diagnostic.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'essai a été conduit sur un œillet *Sim.* var. *le Rêve*, cultivé en pot drainé sur sable inerte alimenté par des solutions nutritives à différentes concentrations en bore : 0, 10, 20, 50, 100, 200, 500 et 1 000 µg/litre, apporté sous forme d'acide borique.

La composition uniforme de la solution nutritive en éléments majeurs, donnée dans le tableau 1, assure la production d'un matériel végétal d'une composition minérale aussi voisine que possible de la concentration moyenne du végétal cultivé en pleine terre, calculée à partir de 150 échantillons prélevés au hasard, dans les conditions de sol et de climat du Sud-Est de la France.

TABLEAU I

Composition de la solution nutritive en m.e. par litre d'éléments majeurs

	NO_3^-	SO_4^{--}	$PO_4H_2^-$	Σ
K^+	2		0,4	2,4
Ca^{++}	7			7
Mg^{++}	1	2		3
Σ	10	2	0,4	12,4

L'équilibre $N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$ de la solution est de 1-0,2-0,8 qui correspond à l'équilibre moyen des exportations (BLANC, 1961). La teneur en oligo-éléments, par litre, est de 200 µg de Mn, 200 µg Zn, 50 µg Cu, 50 µg Mo, 800 µg Fe.

Les apports de solution sont fonction du développement de la plante et de l'évaporation.

Le volume est tel que 50 p. 100 environ de la solution draine afin d'assurer au cours de l'arrosage le renouvellement complet de la solution retenue par le substrat.

L'essai comporte 8 traitements et 4 répétitions par traitement, chaque répétition étant constituée par 2 plants par pot de culture.

La plantation a été effectuée le 4 mai 1972, le premier pincement est intervenu le 24 mai 1972 et la fin de la culture le 12 juin 1973.

Les observations ont porté essentiellement sur l'époque d'apparition, la description et l'évolution des symptômes de carence, la gamme de concentration en bore retenue n'atteignant pas les seuils de toxicité. Les fleurs récoltées ont été comptées et pesées. Des prélèvements de pousses axillaires effectués en cours de culture, suivant un protocole défini par BLANC et DROUINEAU (1962) et BLANC (1962) ont été soumis à l'analyse de même que l'ensemble du plant à l'arrachage.

Les déterminations ont porté sur l'acide phosphorique (colorimétrie au vanado molybdate), le calcium, le potassium et le magnésium (photométrie d'émission et d'absorption). Le bore a été dosé par ionométrie du fluoborate, selon une méthode mise au point par MAZOYER (1976).

L'ensemble des résultats a été analysé statistiquement (test de DUNCAN précédé par une analyse de variance).

RÉSULTATS

1. — *Symptomatologie*

Les premiers symptômes de carence se sont manifestés pour le traitement B = 0 dès le 23 juin, soit 50 jours après le début de la plantation, par un arrêt de l'élongation des tiges florales principales, le développement de nombreuses pousses latérales, et un durcissement du feuillage. Ces premiers symptômes sont suivis de près par l'apparition de taches rouges sur le feuillage puis par un dessèchement des zones atteintes.

Des symptômes semblables sont apparus le 27 juin dans le traitement B = 10 µg/litre, et le 29 juin dans le traitement B = 20 µg/litre. Sur la solution à 50 µg de bore par litre, quelques symptômes apparaissent aux environs du 16 juillet au moment des très fortes chaleurs. A partir de cette date on enregistre également quelques éclatements de gaines, dans la fente desquelles se développent les pousses axillaires, pour ce traitement et le traitement à 100 µg de bore par litre.

Sur les solutions les plus riches en bore (500 et 1 000 µg/litre), on observe un développement excessif des nœuds avec des entre-nœuds très courts.

A partir du mois d'octobre, on note une récupération générale des plants dès la solution à 50 µg par litre, le traitement le plus riche en bore, 1 000 µg par litre, présente des plants beaucoup plus buissonnants et des feuilles beaucoup plus larges que les autres.

2. — *Rendement en fleurs et développement des plants*

Les rendements en fleurs (tabl. 2) sont très limités pour les trois doses les plus faibles en bore. On enregistre ensuite une augmentation significative des rendements, les différences entre les traitements de 50 à 1 000 µg B par litre n'étant pas significatives entre elles.

Le poids moyen de la fleur augmente de façon significative entre 0 et 10 µg d'une part, et entre 10 et 20 µg d'autre part, les différences ultérieures n'étant plus significatives.

Le développement des plants à la récolte a été apprécié par la pesée des pousses herbacées, des tiges florales et des parties les plus âgées que nous appellerons charpentières (tabl. 3).

TABLEAU 2

Rendement moyen en fleurs par pot
et poids moyen de la fleur en fonction de la teneur en bore de la solution nutritive

Les moyennes dans une colonne verticale, suivies d'une même lettre, ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 0,05

Teneur en bore en µg par litre de solution nutritive	Nombre moyen de fleurs par pot	Poids moyen de la fleur en g matière fraîche
0	$1{,}75^{a}$	$12{,}08^{a}$
10	$9{,}00^{b}$	$24{,}58^{b}$
20	$13{,}00^{c}$	$35{,}55^{c}$
50	$24{,}75^{de}$	$40{,}10^{c}$
100	$26{,}25^{de}$	$36{,}03^{c}$
200	$23{,}25^{d}$	$35{,}32^{c}$
500	$24{,}75^{de}$	$40{,}57^{c}$
1 000	$27{,}50^{e}$	$35{,}66^{c}$

TABLEAU 3

Poids frais à l'arrachage, exprimé en g par pot,
des différentes parties des plants en fonction de la teneur en bore des solutions nutritives

Teneur en bore (en µg/litre)	Pousses axillaires	Tiges florales	Charpentières
20	$87{,}50^{a}$	$88{,}50^{a}$	$170{,}50^{a}$
50	$130{,}25^{ac}$	$170{,}50^{a}$	$338{,}75^{b}$
100	$212{,}25^{b}$	$206{,}75^{a}$	$282{,}00^{b}$
200	$184{,}25^{bc}$	$219{,}50^{a}$	$291{,}25^{b}$
500	$153{,}00^{abc}$	$226{,}00^{a}$	$352{,}50^{b}$
1 000	$217{,}75^{b}$	$189{,}25^{a}$	$452{,}00^{c}$

On observe par rapport aux traitements à 20 et 50 µg de bore par litre une augmentation significative du développement des pousses herbacées dans les traitements plus riches en bore. La teneur la plus élevée en bore (1 000 µg par litre) augmente de façon significative la masse de charpentières.

3. — *Composition minérale*

a) *Bore.*

Les déterminations de bore ont été effectuées sur les prélèvements de pousses axillaires en cours de culture et sur la totalité des plants à l'arrachage (tabl. 4).

Les échantillons correspondant aux traitements 0 et 10 µg de bore par litre

n'ont pu être analysés en fin d'essai par suite du dessèchement complet des plants. Les teneurs en bore étaient très faibles dès le premier prélèvement, soit deux mois après le début de la carence. Pour les traitements à 20 et 50 µg par litre, les teneurs en bore sont sensiblement les mêmes. Elles augmentent de façon significative pour le traitement à 100 µg à partir duquel on observe un palier pour les premiers prélèvements.

TABLEAU 4

Teneur en bore du végétal, exprimée en p.p.m. de matière sèche, en fonction de la teneur en B de la solution nutritive en µg par litre, à différentes dates de prélèvement

Teneur en B (en µg/l)	Pousses axillaires	Pousses axillaires	Pousses axillaires	Pousses axillaires	Tiges florales	Charpentières
	13-7-72	17-10-72	20-4-73	12-6-73		
0	12^{a}*	$10{,}2^{a}$*	$7{,}0^{a}$	—	—	—
10	13^{a}	$12{,}5^{a}$	$9{,}0^{a}$	—	—	—
20	25^{b}	$19{,}6^{b}$	$14{,}5^{b}$	$14{,}5^{a}$	$12{,}5^{a}$	$21{,}5^{a}$
50	26^{b}	$19{,}6^{b}$	$15{,}8^{b}$	$21{,}5^{b}$	$16{,}0^{b}$	$33{,}8^{a}$
100	41^{c}	$35{,}8^{e}$	$27{,}5^{c}$	$27{,}3^{b}$	$25{,}8^{c}$	$49{,}8^{b}$
200	40^{c}	$39{,}5^{c}$	$33{,}0^{d}$	$48{,}3^{c}$	$50{,}8^{d}$	$91{,}5^{c}$
500	49^{d}	$40{,}7^{d}$	$42{,}0^{e}$	$50{,}5^{c}$	$57{,}0^{d}$	$82{,}5^{c}$
1 000	46^{d}	$40{,}8^{d}$	$51{,}5^{f}$	$82{,}3^{d}$	$87{,}3^{e}$	$131{,}0^{d}$

* : 1 seul échantillon pour l'ensemble des quatre répétitions.

On observe dans le temps un appauvrissement de la teneur en bore des pousses herbacées jusqu'au traitement à 100 µg de bore par litre, une constance relative pour les traitements 200 et 500 µg par litre et un enrichissement très important pour le traitement à 1 000 µg de bore par litre.

Dans le plant, le bore a tendance à s'accumuler dans les parties les plus âgées, les teneurs en bore des tiges florales et des pousses herbacées n'étant pas significativement différentes entre elles, mais significativement inférieures aux teneurs en bore des charpentières.

b) *Acide phosphorique, potassium, calcium, magnésium.*

Les teneurs en ces éléments n'ont été déterminées que sur les plants en fin de culture (tabl. 5).

On observe très généralement, pour l'ensemble du plant, des teneurs plus élevées en acide phosphorique et des teneurs plus faibles en calcium et magnésium, pour les plus faibles teneurs en bore dans la solution nutritive. Au-delà de 100 µg de bore dans le milieu, on n'observe plus de différences significatives dans la composition minérale des différentes parties du plant.

TABLEAU 5

Composition minérale des plants d'œillet en fin de culture, exprimée en p. 100 de matière sèche en fonction de la teneur en bore de la solution nutritive en µg/litre

Bore dans la sol. nutritive	Pousses axillaires				Tiges florales				Charpentières			
	P_2O_5	K	Ca	Mg	P_2O_5	K	Ca	Mg	P_2O_5	K	Ca	Mg
20	$0,83^a$	$2,63^a$	$1,06^a$	$0,34^a$	$0,70^a$	$2,46^a$	$0,84^a$	$0,26^a$	$0,94^a$	$3,30^a$	$1,34^a$	$0,36^a$
50	$0,71^b$	$2,49^a$	$1,01^a$	$0,37^a$	$0,56^b$	$2,09^a$	$0,87^a$	$0,28^a$	$0,78^b$	$2,96^a$	$1,65^b$	$0,43^b$
100	$0,66^b$	$2,46^a$	$1,25^b$	0,40	$0,61^b$	$2,51^a$	$1,22^b$	$0,36^b$	$0,77^b$	$2,91^a$	$1,51^b$	$0,41^b$
200	$0,69^b$	$2,66^a$	$1,25^b$	0,42	$0,61^b$	$2,51^c$	$1,25^b$	$0,39^b$	$0,83^{ab}$	$3,10^a$	$1,62^b$	$0,42^b$
500	$0,66^b$	$2,50^a$	$1,31^b$	0,42	$0,59^b$	$2,48^a$	$1,05^b$	$0,38^b$	$0,79^b$	$2,94^a$	$1,38^a$	$0,38^a$
1 000	$0,63^b$	$2,49^a$	$1,26^b$	0,42	$0,55^b$	$2,50^a$	$1,18^b$	$0,38^b$	$0,76^b$	$3,12^a$	$1,58^b$	$0,43^b$

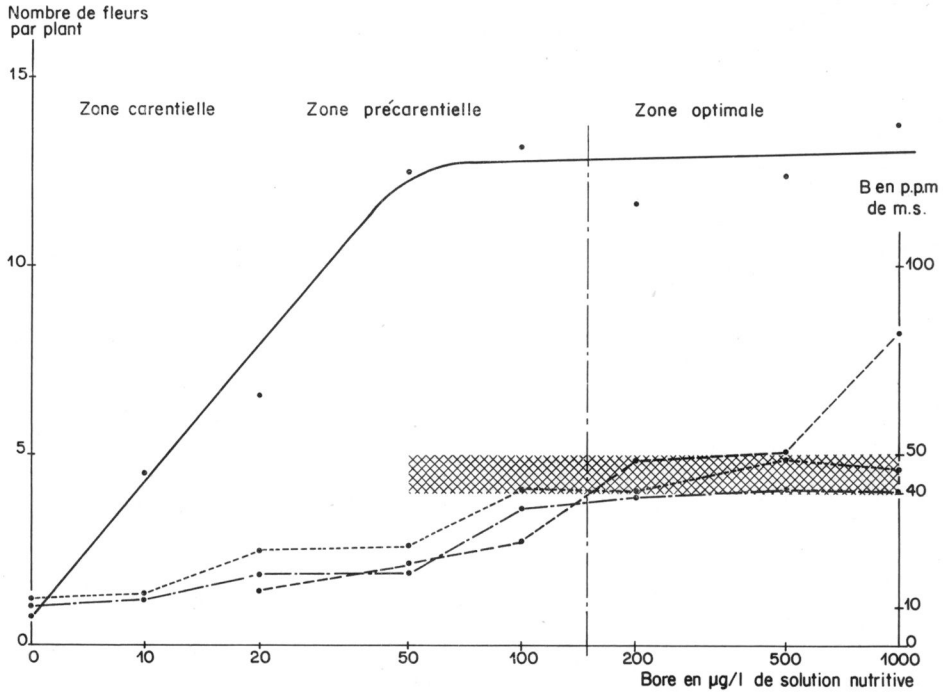


FIG. 1. — *Rendements* (nombre de fleurs par plant) *et teneurs en bore du végétal en cours et en fin de culture, en fonction de la teneur en bore de la solution nutritive*

--------- teneur en bore le 13-7-72
— - — - — — — le 17-10-72
— — — — — — le 12-6-73

DISCUSSION

Nous avons représenté sur la figure 1 la courbe de rendement exprimé en nombre de fleurs par plant et les teneurs en bore des différents prélèvements de végétal effectués en cours et en fin de culture, en fonction de la teneur en bore de la solution nutritive.

Il ressort de l'examen de ce graphique que la gamme de concentration en bore expérimentée couvre la zone carentielle et la zone optimale de fourniture en bore avec une production moyenne de l'ordre de 13 fleurs par pied, mais n'atteint pas la zone dépressive. Bien que le palier soit atteint dès la concentration de 50 µg de bore par litre, il convient, si l'on tient compte des symptômes visuels apparus sur les traitements à 50 et 100 µg par litre pendant la forte chaleur de l'été, de considérer que l'optimum se situerait entre 100 et 200 µg de bore par litre. A partir de 200 µg et au-delà, on enregistre une accumulation de bore dans les charpentières d'abord, puis dans l'ensemble du plant, qui ne s'accompagne pas d'une augmentation de la production et traduirait une consommation de luxe pour une plantation annuelle. Néanmoins, il serait intéressant de vérifier si la masse végétale plus importante récoltée à l'arrachage sur le traitement à 1 000 µg de bore, essentiellement au niveau des charpentières, ne pourrait favoriser une repousse plus vigoureuse après rabattage dans les plantations bisannuelles.

En ce qui concerne le diagnostic, il nous semble intéressant d'observer que le seuil critique pour la production de fleurs, que nous avons situé entre 100 et 200 µg par litre, correspond précisément à un point particulier quant à la teneur en bore des pousses axillaires : pour des concentrations inférieures ou égales à 100 µg dans le milieu, la teneur en bore des jeunes pousses diminue dans le temps et ne dépasse pas 40 p.p.m. de matière sèche ; elle augmente dans le temps et est toujours supérieure à 40 p.p.m. de matière sèche pour des concentrations en bore de la solution égales ou supérieures à 200 µg par litre. Dans nos conditions expérimentales, une teneur de 40 p.p.m. de bore dans les pousses axillaires en début de culture apparaît comme un seuil minimal, une teneur de 50 p.p.m. apparaissant comme suffisante, puisqu'elle permet l'accumulation de quantités importantes de bore dans les parties les plus âgées de la plante.

Ces essais ayant été conduits en culture en solution, dans des conditions optimales de nutrition en calcium, il est possible d'analyser les variations du rapport Ca/B dans la plante, rapport généralement utilisé comme critère de diagnostic de la nutrition en bore (Blanc, 1962 ; Gupta, 1972 ; Jones et Scarseth, 1944) et d'en déduire la valeur optimale pour l'œillet américain.

Ce rapport Ca/B a été calculé pour les pousses axillaires prélevées en cours de culture (avril) et pour les différentes parties du plant en fin de culture (juin). Les résultats sont groupés dans le tableau 6.

La teneur en bore de la plante étant plus fortement influencée par la teneur en bore du milieu de culture que sa teneur en calcium, on enregistre une diminution constante du rapport Ca/B quand la concentration en bore du milieu de culture augmente. Si l'on considère, d'après les résultats culturaux et des observations

visuelles, que la zone de concentration optimale en bore se situe entre 100 et 200 µg de bore par litre de solution nutritive, il est intéressant de noter qu'au niveau des pousses d'avril et de juin et des tiges florales de juin, le rapport Ca/B oscille autour d'une valeur identique moyenne de 360 que nous pouvons, en première approximation, considérer comme la valeur optimale. Des valeurs supérieures à 450 traduisent un déficit de bore par rapport au calcium, des valeurs inférieures à 250 traduisent un excès de bore. Ces valeurs sont voisines des valeurs considérées comme optimales (Ca/B compris entre 300 et 600) par MASTALERZ *et al.* (1956), pour la même espèce. Au niveau des charpentières, le rapport Ca/B est toujours plus faible par suite d'une accumulation relative plus importante de bore que de calcium au niveau des parties âgées de la plante.

TABLEAU 6

Valeurs du rapport Ca/B en fonction de la teneur en bore de la solution nutritive pour les différentes parties du végétal

Date du prélèvement	Matériel végétal analysé	Teneur en bore de la solution nutritive en µg de B par litre							
		0	10	20	50	100	200	500	1 000
Avril	Pousses axillaires	1 440	1 152	771	712	386	334	257	208
Juin	Pousses axillaires	—	—	731	470	458	259	259	153
	Tiges florales	—	—	672	544	473	246	184	135
	Charpentières	—	—	623	488	303	177	167	120

CONCLUSIONS

L'égale sensibilité de l'œillet américain à une carence et à un excès de bore, qui se traduisent à la fois par une diminution et une dépréciation de la production, implique un contrôle rigoureux de la fertilisation boratée. L'étroite relation qui lie la quantité de bore présente dans les différentes parties du végétal au bore disponible dans le milieu de culture permet d'envisager l'analyse du matériel végétal comme moyen de contrôle. Au niveau des pousses axillaires, dont l'analyse a été préconisée pour le contrôle de la nutrition en éléments majeurs, une teneur en bore de 40 p.p.m. apparaît comme un seuil critique au-dessous duquel une carence est à craindre.

L'importance de la nutrition calcique sur les manifestations de carence ou de toxicité en bore nous a conduit à préciser un rapport Ca/B optimal de 360, avec des valeurs extrêmes de 450 et 250. Ce rapport est sensiblement le même au niveau des tiges florales.

Reçu pour publication en avril 1975.

SUMMARY

STUDY OF THE AMERICAN PINK'S BORON NUTRITION

This study has a threefold aim : to specify the American Pink's sensitivity to boron deficiency or toxicity ; to find the composition norms with a view to the development of an analytic diagnostic test ; and to improve the boron fertilization of open air crops.

The authors study the effect of variable amounts of boron dressing on the crops' yield, on the mineral composition of the axillary shoots and on the boron distribution in the various parts of the plant.

A 40 p.p.m. boron content in the axillary shoots at the start of the crop appears to be a minimum limit, the optimal rate being about 50 p.p.m.

The importance of calcium nutrition for boron deficiency and toxicity occurrences led the authors to specify an optimal Ca/B relation of about 360.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER BOR-VERSORGUNG BEI AMERIKANISCHEN NELKEN

Die vorligende Untersuchung verfolgt ein dreifaches Ziel : Bestimmung der Empfindlichkeit der Amerikanischen Nelke auf Mangel oder Toxizität von Bor, aufstellen von Normen für die Zusammensetzung im Hinblick auf einen Analysetest für die Diagnose, und Verbesserung der Bor-Düngung der Freilandkulturen.

Die Autorinnen untersuchten den Einfluss von verschieden grossen Borgaben auf den Ertrag der Kultur, auf die mineralische Zusammensetzung der Seitentriebe und die Verteilung des Bors in den verschiedenen Pflanzenteilen.

Ein Bor-Gehalt von 40 p.p.m. in den Seitentrieben am Anfang der Kultur erscheint als untere Schwelle, während der optimale Gehalt ungefähr bei 50 p.p.m. liegt.

Die Bedeutung der Ca-Versorgung auf das Auftreten von Bor -Mangel oder-Toxizität, hat die Autorinnen dazugeführt, das optimale Ca/B Verhältnis auf ungefähr 360 festzulegen.

РЕЗЮМЕ

Изучение борного питания американской гвоздики.

ДЕНИЗА БЛАН.

Данное изучение преследует троякую цель : определение чувствительности американской гвоздики к борной недостаточности и токсичности, уточнение норм состава растворов для последующей разработки аналитического теста диагностики, и улучшение удобрения бором полевых культур этой гвоздики.

Изучалось влияние внесения разных количеств бора на урожайность культуры, минеральный состав пазушных побегов и рапределение этого элемента по различным частям растения.

Когда содержание бора в пазушных побегах достигает 50 мкг/гр сухого вещества — его можно считать оптимальным, в то время как содержание в 40 мкг/гр этого элемента является минимальным порогом.

Сильное влияние известкового питания на проявление симптомов борной недостаточности или токсичности, наблюдавшееся автором заставило его определить оптимальное соотношение Ca/B. Оно приближается к 360.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANC D., 1961. Évolution de la production de l'œillet. Incidences sur la fertilisation. *C. R. Acad. Agr.*, 464-467.

BLANC D., DROUINEAU G., 1962. Contrôle analytique de la nutrition de l'œillet. *XVe Congrès International d'Horticulture*, Bruxelles.

BLANC D., 1962. Utilisation de l'analyse foliaire pour le contrôle de la nutrition de l'œillet. *C. R. Acad. Agr.*, 791-797.

GUPTA V. C., 1972. Interactions effects of boron and lime on barley. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **36**, 332-334.

JONES H. E., SCARSETH G. D., 1944. The calcium boron balance in plants as related to boron needs. *Soil Sci.*, **57**, 15-23.

MASTALERZ J. W., DRAKE M., STECKEL J. E., 1956. Boron deficient carnations. *Florist's Review, CXVLLL*, 3059.

MAZOYER R., 1976. L'ionométrie : ses possibilités d'application au dosage du bore en agronomie (à paraître).

PARKER J., 1971. Calcium-boron nutrition of carnation. *Colorado Flower Growers Association*, Inc Bul. 259.

Ann. agron., 1975, **26** (4), 337-350.

MINÉRALISATION DE L'AZOTE D'UN SOL DE LIMON SOUMIS A LA PERCOLATION LENTE DE SOLUTIONS AZOTÉES

G. LEFÈVRE
avec la collaboration technique de F. PONTHIEU

Station d'Agronomie, I. N. R. A.,
80000 Amiens

RÉSUMÉ

Le phénomène de surminéralisation de l'azote du sol, observé dans les conditions naturelles à la suite d'apports d'engrais, n'a pu jusqu'à présent être reproduit dans des essais de laboratoire.

L'utilisation d'une technique de percolation lente, permettant à la fois de modifier, dans des conditions bien définies, la concentration de la solution du sol en azote nitrique, de conserver un milieu aéré et de réaliser une extraction continue, a permis de mettre en évidence l'influence de la concentration de la solution de percolation d'une part sur la libération d'azote minéral (surminéralisation) et d'autre part sur la consommation d'azote minéral en présence de matériel carboné (surconsommation).

INTRODUCTION

La dynamique de l'azote dans le sol a donné lieu à de nombreuses études (BARTHOLOMEW, 1965) dont les résultats et leur interprétation sont, dans une certaine mesure, dépendants de la méthode utilisée. L'examen le plus global, comportant des prélèvements de sol effectués à intervalles réguliers, fournit une image de la chronologie de la minéralisation en place, soumise aux aléas climatiques, sans que soient maîtrisés les facteurs température, pluviométrie et éventuellement intervention de l'absorption radiculaire. Cette méthode, cependant, permet de comparer, dans des conditions, ainsi mal définies mais identiques, l'effet d'apports organiques et/ou minéraux dont le résultat peut encore être lié à la date d'intervention (LEFÈVRE *et al.*, 1965 ; LIBOIS, 1965 ; LEFÈVRE, 1969 ; MOULINIER, 1969).

Ces essais, rarement couplés avec une mesure des entraînements par drainage, ne permettent pas de faire, à proprement parler, un bilan auquel il faudrait encore adjoindre la possibilité de pertes gazeuses (ALLISON, 1955).

Inversement, les mesures de minéralisation en laboratoire (VAN SHREVEN, 1968 ;

MOULINIER, 1969) procèdent d'une autre démarche et ne peuvent reproduire la complexité des conditions naturelles et de leurs variations dans le temps. Elles n'intégrent pas, en particulier, la mobilité de la solution du sol, ayant pour effet d'empêcher l'établissement d'équilibres éventuels et réalisant la plupart du temps une « extraction » de l'azote minéral, soit par le drainage, soit par la consommation végétale.

Avec ou sans utilisation d'éléments marqués (I.A.E.A., 1968), elles ont cependant permis d'étudier de nombreux mécanismes dans des conditions plus ou moins orientées et d'expliquer ainsi petit à petit, en les isolant, les observations réalisées *in situ*.

Cependant, les diverses techniques utilisées jusqu'alors pour étudier la minéralisation en laboratoire n'ont pu mettre en évidence la *surminéralisation* (LIBOIS, 1965 ; CHABANNES et SIMON, 1968 ; DELAS et MOLOT, 1971). Pourtant, ce phénomène est particulièrement important à étudier puisque sa connaissance permettrait de prévoir les effets sur la minéralisation de l'azote organique du sol, soit d'un apport d'azote minéral extérieur, soit à l'inverse, d'un appauvrissement du milieu en azote minéral.

Sa réalisation semble dépendre de l'obtention d'un équilibre dont les facteurs essentiels sont difficiles à maîtriser dans les conditions expérimentales habituelles au laboratoire. Ces dernières ne permettent pas de rendre compte en particulier de l'influence de la concentration en azote minéral de la solution du sol sur cet équilibre.

I. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1. 1. — *Matériel*

Il a pour objet de répondre aux deux contraintes suivantes :

1° permettre de répartir d'une façon uniforme et sûre, dans toute la masse de terre servant de support à la minéralisation, un supplément d'azote minéral ;

2° fournir un système d'extraction différé, mais permanent, permettant de réaliser des observations en continu.

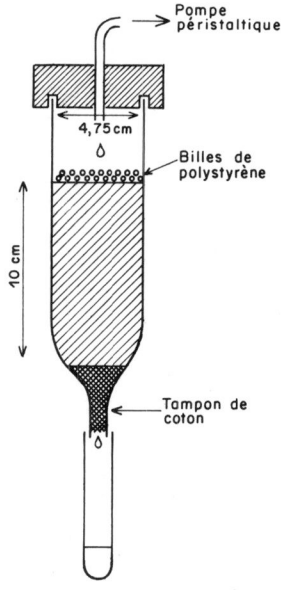


FIG. 1. — *Dispositif expérimental*

L'étude du fonctionnement des systèmes lysimétriques montre que, lorsque les pluies ne sont pas instantanément trop importantes, la percolation se fait en milieu non saturé, si bien que l'eau est drainée lentement à travers un milieu restant aéré ; ces conditions paraissent répondre à nos objectifs.

On a donc cherché à reconstituer les effets d'une pluie peu importante, non saturante et régulière. Des essais préliminaires ont permis d'obtenir un dispositif fournissant un entraînement parfaitement régulier (la quantité d'eau percolée étant égale à celle apportée) sans que les pores « interagrégats » soient remplis d'eau.

Pour cela, de la terre préalablement humectée est passée à l'état humide à travers un tamis à trous ronds de 2 mm, pour former des agrégats, ces derniers étant ensuite séchés à l'air. 200 g de la terre ainsi préparée sont placés dans des allonges cylindriques en verre de 20 cm de hauteur et de 4,75 à 4,80 cm de diamètre, dont ils occupent 10 cm de hauteur environ. Deux épaisseurs de billes en polystyrène, mises à la surface, permettent de répartir la goutte d'eau distribuée par un canal alimenté par une pompe péristaltique et traversant une cape de polystyrène empêchant l'évaporation (fig. 1).

Ce système, dans lequel les sorties liquides sont égales aux entrées, a été utilisé pour imbiber le sol d'une solution plus ou moins enrichie en azote nitrique et le maintenir pendant un certain temps dans ces conditions, avec les variantes expérimentales décrites ci-dessous.

1. 2. — *Facteurs expérimentaux*

Trois facteurs ont été retenus :

a) *concentration en azote nitrique des solutions apportées.*

Six concentrations différentes ont été utilisées : 0, 2,5, 10, 50, 200, 300 mg/litre d'azote nitrique sous forme de nitrate de potasse.

b) *adjonction ou non de paille broyée.*

Une série a reçu 600 mg de paille en mélange avec les 200 g de terre (soit un apport de 0,3 p. 100 ou équivalent à 6 t de paille pour 2 000 t de terre).

c) *débit d'apport de solution et ensuite d'eau.*

Deux débits ont été retenus :

— soit 7 à 9 ml par jour représentant, pour les 18 cm² environ de surface, des pluies voisines de 4 à 5 mm/jour (débit d) ;
— soit 12 à 15 ml par jour ou 7-8 mm/jour (débit D).

L'arrosage a été réalisé du lundi matin 9 h au vendredi soir 18 heures, soit 105 heures d'arrosage (sur les 168 de la semaine) fournissant donc par semaine : soit 30 à 40 ml (17 à 22 mm), soit 50 à 65 ml (28 à 35 mm).

Les traitements ont été combinés de la façon suivante :

Traitement organique	Sans paille		Avec paille	
Débit	d	D	d	D
Concentration en azote de la solution d'arrosage (N mg/litre)				
0	A	X	A_p	X_p
2,5	B	Y	B_p	Y_p
10	C		C_p	
50	D		D_p	
100	E		E_p	
300	F	Z	F_p	Z_p

La terre employée dans cette étude provient d'un sol de limon classique de Picardie (14 p. 100 d'argile, 25 p. 100 de limon, 58 p. 100 de sables très fins), de pH 7,2, portant une succession de cultures dont les résidus enfouis assurent l'entretien organique du sol (2 p. 100 de matières organiques, 1,1 p. 1 000 d'azote).

1. 3. — *Conditions expérimentales de mesure*

Ainsi que précisé précédemment, des solutions diversement enrichies en azote nitrique sous forme de nitrate de potasse sont d'abord fournies au débit d ou D, pour « installer » dans la terre des allonges une solution de concentration déterminée.

La différence entre la quantité de solution apportée (entrée) et la quantité d'eau recueillie (sortie) représente ce qui a été utilisé pour humecter la terre et assurer le fonctionnement du dispositif. Les valeurs calculées pour chaque colonne présentent, à travers les variations expérimentales, une bonne concordance autour d'une moyenne de 54 ml. Ce volume, ramené au total, correspond à une humidité de 21 p. 100 en poids et de 30 p. 100 en volume. La porosité totale étant de l'ordre de 55 p. 100 en volume, il en ressort que l'air peut encore occuper 25 p. 100 environ du volume total. Cet espace, visible, ne présente effectivement pas d'eau apparente.

Les 54 ml de solution retenus avant que ne commence la percolation représentent également le volume nécessaire pour entraîner un lessivage complet de la colonne qui, suivant les données précédentes, demande de 1 semaine 1/2 à 2 semaines quand l'apport est fait au débit d, et 1 semaine environ pour D.

Les lessivats ont été recueillis par fraction de 20 à 25 ml sur lesquels ont été déterminées les teneurs en azote nitrique [1] et en potassium (les observations sur le potassium feront l'objet d'un autre mémoire).

L'apport de solutions diversement enrichies a été de 300 ml correspondant donc environ à six passages à travers la colonne, répartis sur une période de 9 à 10 semaines pour le faible débit et de six semaines pour le débit fort. La percolation a été ensuite assurée avec de l'eau permutée toujours aux mêmes débits.

Les résultats des mesures ont été regroupés par périodes pour lesquelles les concentrations en azote nitrique des percolats restent voisines d'une certaine valeur caractéristique :

a) *Périodes observées pendant le lessivage avec des solutions plus ou moins enrichies :*

— La première période coïncide avec l'obtention du premier lessivage complet de la colonne — après son remplissage équivalent à deux passages — obtenu après un mois environ avec le débit d et deux semaines avec D. Ce premier percolat recueille l'azote nitrique présent dans l'échantillon de sol séché (Birch, 1958 ; Chabannes, 1969), augmenté de l'azote minéralisé d'une part au cours de la fabrication des agrégats (Van Shreven, 1968) et, d'autre part, au cours de la percolation elle-même, faite à la température du laboratoire (18-20°) ;

TABLEAU I

Caractéristiques des périodes choisies pour l'étude des percolats

Apports volume total en ml	Solutions plus ou moins enrichies				Eau déminéralisée	
	50 à 60	100-120 →	150-180	→ 300		
Percolats volume total en ml		1er lessivat 50-60 →	2e lessivat 100-120	Fin d'apport d'enrichissement → 250-280	Rinçage transition 300-400	Ensuite 600 1 000 2 000
Temps d	4-5 semaines ← →		9 à 10 semaines ← →		→	6 mois
Temps D	2 semaines ← →		6 semaines ← →		→	

[1] La détermination de la teneur en azote nitrique des percolats a été faite par ionométrie.

— La deuxième période correspond au deuxième lessivage qui entraîne encore des solutions plus riches en azote nitrique que celles apportées ;

— La troisième période commence avec le troisième percolat qui passe à peu près à la concentration d'apport et se termine lorsqu'après 300 ml de fourniture de solution, la concentration du percolat commence à s'abaisser. Ceci se produit lorsque le volume percolé est compris entre 250 et 280 ml.

b) *Périodes observées pendant le lessivage avec de l'eau déminéralisée :*

— La première période (de transition) correspond au rinçage de la colonne ;

— dans la période suivante, on observe une concentration de « croisière » liée à la minéralisation continue de l'azote du sol. Celle-ci persiste jusqu'à la fin des mesures, après cinq percolations correspondant à un volume percolé de 600 ml pour les débits faibles et de 1 000 à 2 000 ml pour les débits élevés, la durée totale des observations atteignant 6 mois environ.

Le découpage en ces différentes périodes et leurs durées respectives sont présentés dans le tableau 1.

II. — RÉSULTATS

2. 1. — *Influence de la concentration en azote de la solution d'apport sur la minéralisation*

Comparaisons A, B, C, D, E, F (débit d), (fig. 2).

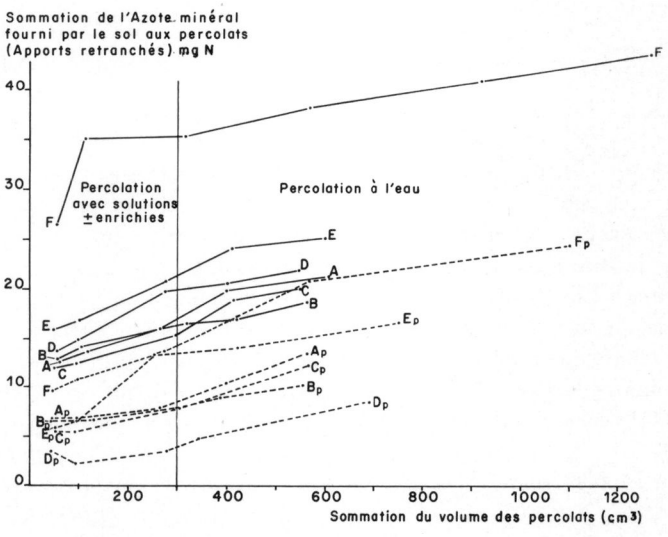


FIG. 2. — *Influence de la concentration en azote de la solution d'arrosage sur la minéralisation de l'azote du sol*
(traitements T_p et T = avec et sans paille)

A, A_p = 0 mg/l N_{NO_3} — D, D_p = 50 mg/l N_{NO_3}
B, B_p = 2,5 — — — E, E_p = 100 — —
C, C_p = 10 — — — F, F_p = 300 — —

— Considérons tout d'abord les quantités d'azote fournies par le sol pour chaque traitement à la fin des essais (tabl. 2, (3)) évaluées par différence entre l'azote percolé (tabl. 2 (1)) et l'azote apporté (tabl. 2 (2)).

Dans les traitements E et F (enrichissement respectif avec des solutions à 100

et 300 mg/litre d'azote), la minéralisation de l'N du sol a été plus importante que dans le témoin. Ces résultats correspondent à ce qui, dans des observations au champ, a été appelé la *surminéralisation*. Celle-ci est surtout très manifeste pour la concentration la plus élevée.

TABLEAU 2

Minéralisation de l'azote du sol et concentration de l'azote apporté

Traitements	A	B	C	D	E	F
Concentration de la solution d'apport (N mg/l)	0	2,5	10	50	100	300
Volume percolé (ml)	610	563	549	552	603	567
(1) N percolé (mg)	21,3	19,4	23,2	36,6	54,3	132
(2) N apporté par les solutions (mg)	0	0,71	3,1	14,7	29,1	93,7
(3) N fourni par le sol (mg)	21,3	18,7	20,1	21,9	25,2	38,3
Différence avec A (témoin) en mg N	0	— 2,6	— 1,2	+ 0,6	+ **3,9**	+ **17,0**

Inversement, l'utilisation de solutions peu concentrées (2,5 et 10 mg/litre) a plutôt entraîné une minéralisation plus faible que celle du témoin.

Les différences (petites) pourraient ne pas être significatives, mais pour B (2,5 mg/l), la diminution en valeur relative atteint 12 p. 100. L'équilibre semble être à peu près réalisé avec la solution D (50 mg/litre).

— L'analyse des résultats obtenus dans les percolats successifs (cf. tabl. 1) permet de préciser les modalités d'apparition de la surminéralisation :

Dès le premier percolat obtenu 20 à 30 jours après le début de l'essai, on note que le traitement F a *entraîné une production d'azote minéral double de celle du témoin* (tabl. 3, (I)).

L'action inverse pour les solutions peu concentrées, ainsi que d'autres observations reportées dans ce mémoire, font penser que cette différence ne peut être attribuée à une meilleure extraction de l'azote du sol par une solution saline concentrée.

Il en ressort par contre que c'est une réaction rapide qui se poursuit tant que dure le traitement, puisque, après récupération de toute la solution d'enrichissement (entre 350 ml et 400 ml de percolation), la situation est celle indiquée dans le tableau 3, (II).

L'effet négatif des solutions à faible concentration se maintient également.

Ensuite, les percolations par l'eau, de l'ordre de 200 ml, soit quatre passages, ne traduisent plus, durant une période de deux mois environ, de différences notables de minéralisation (tabl. 3, (III)).

Ainsi, la surminéralisation apparaît comme une réponse rapide du sol subissant une augmentation importante de la concentration en azote de sa solution.

Lorsque le déséquilibre ainsi provoqué est éliminé, la minéralisation de l'azote du sol semble peu affectée par les traitements antérieurs (équidistance des courbes de la figure 2 après 400 ml de percolation).

TABLEAU 3

N minéral dans les percolats successifs en fonction des traitements azotés
(en mg N)

Traitements		A	B	C	D	E	F
Concentration de la solution d'apport (N mg/l)		0	2,5	10	50	100	300
Volumes percolés (I) 50-60 ml 1er percolat	N minéral dans le percolat	12,6	12,9	12,0	13,7	15,9	26,4
	— N minéral du témoin	0	+ 0,3	— 0,6	+ 1,1	+ 3,3	+ 13,8
(II) 400 ml	N minéral dans le percolat	19,8	17,0	18,8	20,6	24,1	36,5
	— N minéral du témoin	0	— 2,8	— 1,0	+ 0,8	+ 4,3	+ 16,7
	N minéralisé après le 1er percolat en + ou en — du témoin	0	— 3,1	— 0,4	— 0,3	+ **1,0**	+ **2,9**
(III) 600 ml environ	N minéral dans le percolat	21,3	18,7	20,1	21,9	25,2	38,3
	— N des 400 ml précédents	1,5	1,7	1,3	1,3	1,2	1,8

Cette figure semblerait cependant montrer une différence de comportement entre les traitements E (100 mg/litre N) et F (300 mg/litre N). Pour E, la surminéralisation se poursuit effectivement pendant toute la durée de l'essai, tandis que pour F, les percolats, après la deuxième période de lessivage, passent à la concentration de la solution d'apport (sans trace de minéralisation). Le phénomène observé semble donc avoir une limite qui n'influe cependant pas sur la minéralisation « normale » ultérieure.

2. 2. — *Influence d'un apport de paille* (fig. 2)

Rappelons que les traitements paille (T_p) sont constitués par le mélange de 600 mg de paille à 200 g de terre.

a) *Percolation à l'eau pure* (A, A_p) (tabl. 4).

La consommation d'azote minéral accompagnant la décomposition de la paille vient en compétition avec la minéralisation de l'azote organique sol. *Dès le premier percolat,* on observe une *différence* (*importante*) de 5,6 mg.

Cette manifestation ne peut être attribuée ici qu'à une intervention micro-

bienne et sa vitesse de réponse est comparable à celle traduisant la surminéralisation. Le déficit apparent de minéralisation se poursuit pendant 4 mois à l'issue desquels le blocage d'azote minéral atteint 9,4 mm.

TABLEAU 4

Consommation d'N minéral en présence de paille
(percolation à l'eau pure)

		1 mois 1er percolat	1 mois 1/2 2e percolat	2 mois 1/2 # 260 ml	4 mois # 400 ml	# 600 ml
Azote minéral dans les percolats (mg N)	A	12,6	13,6	16,1	19,8	21,3
	A_p	6,9	6,9	7,9	10,4	13,5
$A - A_p$		5,6	6,6	8,2	9,4	7,8

b) *Influence de la concentration en azote nitrique de la solution d'enrichissement.*

TABLEAU 5

Consommation d'azote minéral en présence de paille.
Influence de la concentration en azote nitrique de la solution d'arrosage

Concentration de la solution d'arrosage N_{NO_3} (mg/l)		Lessivage avec solution d'apport			Lessivage à l'eau	
		1er percolat	2e percolat	# 260 ml	# 400 ml	# 600 ml
0	$A - A_p$	5,66	6,63	8,20	**9,40**	7,80
2,5	$B - B_p$	7,24	**8,50**	8,40	8,00	8,40
10	$C - C_p$	6,33	7,44	7,42	6,60	**7,80**
50	$D - D_p$	10,15	12,82	15,20	**15,71**	13,37
100	$E - E_p$	10,13	**10,35**	7,44	10,09	8,45
300	$F - F_p$	16,80	**24,30**	21,50	19,60	17,50

Pour les solutions à faible concentration (jusqu'à 10 mg/litre d'N), la consommation apparente d'N nitrique est comprise entre 7,8 et 9,5 mg. A partir de 50 mg/l d'N, celle-ci passe à 15 mg pour atteindre 24 mg avec la solution F (300 mg/l d'N), E restant à 10 mg. Ces chiffres représentent respectivement 13 à 15,6, 25, 16,7 et 40 g d'N par kg de paille (ou kg par tonne). Cette *surconsommation* d'azote a déjà été trouvée dans des essais de décomposition de paille, en flacons, au laboratoire (SIMON-SYLVESTRE, 1960).

On peut observer sur la figure 2 que jusqu'à D_p, le blocage d'azote correspond pratiquement à un arrêt de la minéralisation nette se produisant pendant toute la période des apports d'azote, c'est-à-dire pendant deux mois et demi environ.

Pour les traitements E_p et F_p, au contraire, la minéralisation se poursuit : on peut alors penser que la surminéralisation surpasse la surconsommation et que les deux phénomènes ne coexistent que s'il reste dans la solution du sol assez d'azote minéral pour permettre à la surminéralisation de se manifester (bilan net positif).

2. 3. — *Influence du débit*

a) *Sur la minéralisation.*

α. *Solutions peu concentrées* (fig. 3, tabl. 6, (I)).

Le débit de percolation de X et Y (débit D, concentration en N mg/l : 0 et 2,5) étant plus rapide que celui de A et B (débit d, concentration en N mg/l : 0 et 2,5), le *temps* de minéralisation correspondant à la fourniture d'un volume égal de percolat est plus faible. De plus, on a vu que le lessivage par la solution B diminuait la quantité extraite. Ces deux phénomènes conjugués se traduisent par une différence en faveur du débit le plus faible, plus marquée pour le lessivage à l'eau que pour le lessivage avec la solution à 2,5 mg/litre d'azote nitrique.

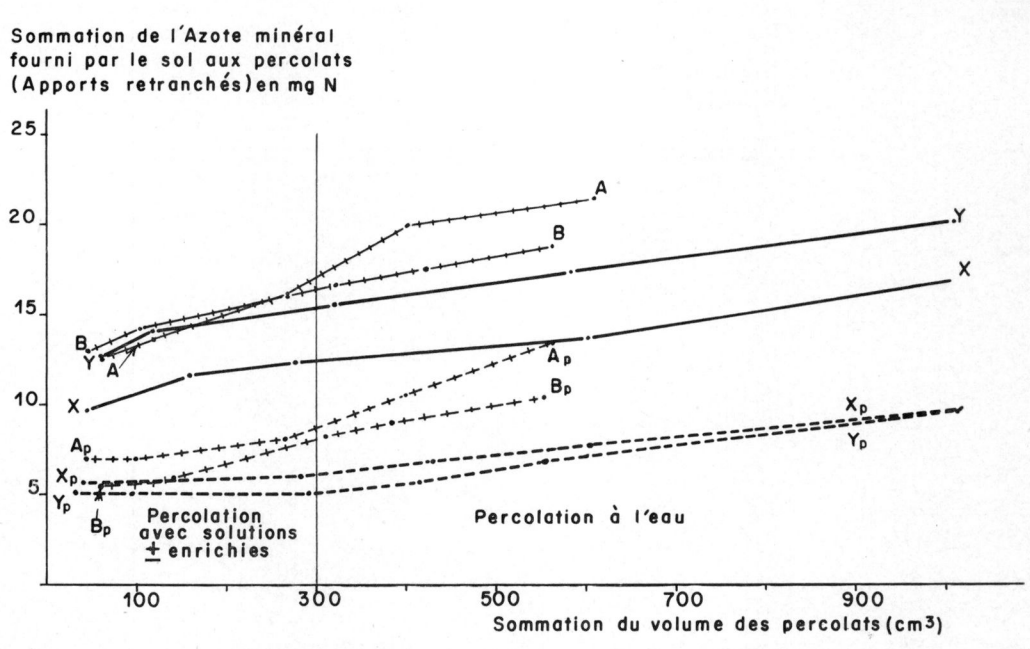


FIG. 3. — *Influence du débit et de faibles concentrations en azote de la solution d'arrosage sur la minéralisation de l'azote du sol, en présence ou non de paille*

(débit d = A et B ; débit D = X, X_p et Y, Y_p ; A, A_p, X, X_p = 0 mg/l N_{NO_3} ; B, B_p, Y, Y_p = 2,5 mg/l N_{NO_3})

β. *Solutions concentrées* (fig. 4, tabl. 6, (II)).

Dans la comparaison F — Z (traitement à 300 mg/l d'N, débits d et D), l'effet temps semble jouer en début d'observation, mais le renouvellement plus rapide de la solution concentrée paraît favoriser encore plus la surminéralisation qui se poursuit en Z, alors qu'elle est arrêtée au deuxième percolat pour F.

Donc, deux effets opposés : *l'augmentation du débit de percolation diminue les pertes en milieu « pauvre » et les accroît en milieu « riche »*. Mais il ne faut pas oublier que dans ces essais, le mot perte est synonyme de production sinon d'entraînement d'azote minéral.

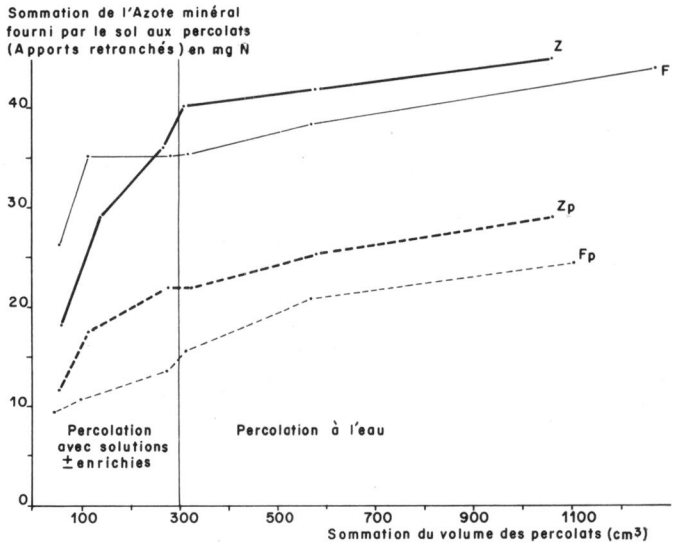


FIG. 4. — *Influence du débit et d'une forte concentration en azote de la solution d'arrosage* (300 mg/l N_{NO_3}) *sur la minéralisation de l'azote du sol* (débit d : F, F_p ; débit D = Z, Z_p) *en présence ou non de paille*

TABLEAU 6

Influence du débit et de la concentration en azote nitrique de la solution d'arrosage sur la minéralisation de l'azote du sol

(en mg N)

	1er passage	2e passage	Fin d'apport	Transition	Après
(I) A — X	+ 2,9	+ 2,0	+ 3,8	+ 7,0	+ 7,6
(I) B — Y	+ 0,3	+ 0,2	+ 1,0		+ 1,4
(II) F — Z	+ 8,0	+ 6,3	+ 3,5	— 4,8	— 3,6

b) *Sur la consommation d'azote en présence de paille.*

α. *Solutions peu concentrées* (fig. 3, tabl. 7, (I)).

Pour les faibles concentrations, la présence de paille ne fait que « translater » les observations sans paille.

β. *Solutions concentrées* (fig. 4, tabl. 7, (II)).

De même que Z devenait supérieur à F, ici Z_p est toujours supérieur à F_p confirmant que l'augmentation du débit favorise plus la surminéralisation que la consommation liée à la décomposition de la paille.

TABLEAU 7

Influence du débit sur la minéralisation de l'azote du sol en présence de paille (en mg N)

	1er passage	2e passage	Fin d'apport	Transition	Après
(I) $A_p - X_p$	+ 1,4	+ 1,2	+ 1,9	+ 3,6	+ 5,8
(I) $B_p - Y_p$	+ 0,5	+ 0,6	+ 3,2	+ 3,3	+ 3,5
(II) $F_p - Z_p$	— 2,2	— 6,7	— 8,3	— 6,3	— 4,5

c) *Comparaison du blocage maximal d'azote aux deux débits* (en mg N).

Organisation maximale :

$$(A - A_p) = 9{,}4 \qquad (X - X_p) = 6{,}3$$
$$(B - B_p) = 8{,}5 \qquad (Y - Y_p) = 10{,}5$$
$$(F - F_p) = 24{,}3 \qquad (Z - Z_p) = 16{,}6$$

On a vu que l'augmentation de débit avec la solution à 2,5 mg/litre avait relativement peu d'effet, au début du phénomène, sur la minéralisation (B — Y) et un peu plus sur la consommation d'azote ($B_p - Y_p$), si bien qu'en définitive, la fixation d'azote par la paille est un peu favorisée par le débit plus élevé.

Par contre, avec un lessivage à l'eau ou avec une solution relativement concentrée, l'augmentation du débit diminue l'organisation (9,4 — 6,3 = 3,1 et 24,3 — 16,6 = 7,7) et accroît donc la minéralisation nette ou les risques de pertes ou encore les possibilités d'adsorption par les racines.

CONCLUSIONS

La percolation lente utilisée dans ces essais a permis d'étudier l'effet d'un apport extérieur d'azote nitrique sur deux manifestations de l'activité microbienne du sol liée au cycle de l'azote : la minéralisation et l'organisation.

L'essai a confirmé que les produits résultant de l'activité microbienne doivent être effectivement entraînés rapidement pour que leur propre influence sur la concentration de la solution de percolation ne modifie pas, de façon durable, les conditions du milieu dont on étudie les réactions.

L'accroissement de la concentration de la solution percolante a entraîné d'une part une surminéralisation et, d'autre part, en présence de résidus carbonés, une surconsommation d'azote minéral, phénomène déjà connu. Ces deux manifestations restent simultanées et, en présence d'une quantité suffisante d'azote minéral, la surminéralisation dépasse la surconsommation, entraînant une minéralisation nette positive. La surminéralisation se manifeste rapidement dès la première percolation suivant la réhumectation du sol. Ses effets ressemblent à ceux que l'on observe après une stérilisation du milieu, mais ici le résultat est sous forme nitrique (et non pas ammoniacale). Ils semblent donc liés à une modification brutale des conditions de milieu que l'on peut effectivement rencontrer dans le sol à la suite de variations des conditions climatiques.

D'autres aspects de ces manifestations sont à l'étude en vue de prévoir leur importance en fonction d'autres caractéristiques des sols et de leurs antécédents culturaux.

Reçu pour publication en août 1975.

SUMMARY

NITROGEN MINERALIZATION OF A SILTY SOIL SUBJECTED TO THE SLOW PERCOLATION OF NITROGENOUS SOLUTIONS

It has not as yet been possible to reproduce in the laboratory the phenomenon of excessive nitrogen mineralization of the soil, observed in natural conditions following fertilization.

By the use of a slow percolation technique to modify the nitrate nitrogen concentration of the soil solution, within well defined conditions and maintain an aerated medium whilst a continuous extraction is carried out, it has been possible to show the effect of the concentration of the percolation solution on the liberation of inorganic nitrogen (over mineralization) and also on the consumption of inorganic nitrogen in the presence of carbon material (over consumption).

ZUSAMMENFASSUNG

DIE STICKSTOFFMINERALISATION IN EINEM LEHMBODEN BEI LANGSAMER DURCHSICKERUNG MIT STICKSTOFFHALTIGEN LÖSUNGEN

Die Erscheinung der erhöhten Stickstoffmineralisierung, die man unter natürlichen Bedingungen im Anschluss an die Düngerausbringung festgestellt hat, konnte bis jetzt noch nicht in Laborversuchen nachgewiesen werden.

Die Anwendung der Technik der langsamen Durchsickerung erlaubt es nun, unter bekannten Bedingungen die Konzentration der Bodenlösung an Nitratstickstoff zu variieren und durch die andauernde Extraktion, bei normaler Bodenbelüftung, den Einfluss der Konzentration der Sickerlösung auf die Stickstofffreisetzung wie auch auf die Stickstoffaufnahme durch die organischen Bodenbestandteile festzustellen.

РЕЗЮМЕ

Минерализация азота в суглинистой почве при медленном просачивании азотистых растворов.

Г. ЛЕФЕВР, ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ Ф. ПОНТЬЕ.

Явление сверх-минерализации азота почвы, наблюдаемое в природных условиях при внесении удобрений, невозможно было до сих пор воспроизвести в лабораторных условиях.

Применение техники медленного просачивания, позволяющей в одно и то-же время изменить в очень определенных условиях концентрацию нитратного азота в почвенном растворе, сохранив при этом аерацию среды, и — реализацию постоянного экстрагирования, выявило влияние концентрации просачивающегося раствора на освобождение минерального азота, с одной стороны, и на потребление минерального азота в присутствии углеродных соединений (свех-потребление) — с другой.

REMERCIEMENTS

Nous remercions MM. GOUNY, RÉMY, et Mme BONIFACE (respectivement, I.N.R.A. Agronomie, Montfavet, Laon, et Versailles) pour les critiques constructives faites sur la présentation de ce mémoire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON F. E., 1955. The enigma of soil nitrogen balance sheets. *Adv. Agron.*, VII, 213-251.

BARTHOLOMEW W. V., CLARK F. E., 1965. *Soil nitrogen.* Agronomy n° 10, American Society of Agronomy.

BIRCH H. F., 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, **10**, 9-31.

CHABANNES J., 1969. Influence de la dessiccation sur la détermination des variations saisonnières de l'azote minéral des sols. *C. R. Acad. Agric.*, 783-792.

CHABANNES J., SIMON-SYLVESTRE G., 1968. Influence d'un apport d'ammonitrate sur l'alimentation d'un blé d'hiver en N-S-P en relation avec la minéralisation de ces éléments dans le sol. *C. R. Acad. Agric.*, 1284-1289.

DELAS J., MOLOT C., 1971. Stimulation de la minéralisation par apport d'azote minéral dans un sol de Touyas. *C. R. Acad. Agric.*, **57** (7), 502-511.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1968. *Isotopes and radiation in soil organic matter studies* (Vienne).

LEFÈVRE G., 1969. Observations sur les variations simultanées des teneurs en eau et en azote minéral d'un sol. *Ann. agron.*, **20**, 627-638.

LEFÈVRE G., HIROUX G., HÉBERT J., KOTTELANNE E., 1965. Observations de la minéralisation en sol nu. *C. R. Acad. Agric.*, 852-858.

LIBOIS A., 1965. Études de l'évolution de l'azote minéral dans un sol nu de la région dijonnaise. *C. R. Acad. Agric.*, 545-551.

MOULINIER H., 1969. La minéralisation de l'azote dans un sol stérilisé par la vapeur et ses conséquences sur la fertilité. *Bull. Assoc. Fr. Étud. Sol*, **6**, 21-27.

SIMON-SYLVESTRE G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le sol. Étude générale et répercussions sur la microflore du sol. *Ann. agron.*, **11** 5-53 et 177-219 (Thèse, Paris).

VAN SCHREVEN D. A., 1968. Mineralisation of the carbon and nitrogen of plant material added to soil and of the soil humus during incubation following periodic drying and rewetting of the soil. *Plant and Soil*, 226-245.

Ann. agron., 1975, **26** (4), 351-362.

EFFETS D'UNE DÉFICIENCE EN MAGNÉSIUM CHEZ LE POMMIER. ÉVOLUTION DES ULTRASTRUCTURES DE LA FEUILLE DE POMMIER CARENCÉ

Simone CHEVALIER et Claire HUGUET*

Laboratoire de Physiologie végétale,
Université des Sciences et Techniques du Languedoc, C. N. R. S.,
34060 Montpellier Cedex

* *Laboratoire d'Agronomie,*
Station de Science du Sol,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

L'évolution particulière des ultrastructures dans les feuilles des pommiers partiellement privés de magnésium aboutit à la dégénérescence des cellules et à leur mort. La modification des divers organites précède l'apparition des symptômes macroscopiques et son observation pourrait constituer un test précoce de carence.

INTRODUCTION

Les agronomes se sont, depuis longtemps, préoccupés des problèmes qui se rattachent à la nutrition magnésienne des plantes cultivées. Dès 1930, WALLACE constate chez de jeunes pommiers (cultivar Stirling Castle, greffés sur Malling 1) privés de magnésium, parallèlement à une diminution de la teneur des divers organes en cet élément, une influence de la carence sur l'absorption du phosphore, dont le taux augmente dans les feuilles, mais diminue dans le tronc et les rameaux primaires. En 1951, cet auteur formule le diagnostic des symptômes visuels caractérisant les cultures annuelles (betterave, chou, laitue, orge, maïs...) et pérennes (cerisier, groseiller, poirier, pommier, vigne...) soumises à une alimentation déficiente en magnésium. La recherche de la composition ionique du sol responsable de cette insuffisance

nutritive, et celle de méthodes correctives appropriées, ont fait l'objet de nombreux travaux. Ainsi, BOYNTON et BURREL (1954) constatent qu'un excès de potassium dans le sol augmente la sensibilité des pommiers (cultivar McIntosh) à la carence, en raison d'interférences entre les ions K^+ et Mg^{++}. BLANCHET (1954) fait état des modifications qu'entraîne une carence en magnésium vis-à-vis de l'absorption du calcium et de l'azote chez le pommier (variété Reinette de Landsberg, greffé sur East Malling 9). TROCMÉ et GRAS (1964), qui s'intéressent aussi à la nutrition magnésienne des arbres fruitiers, complètent leurs études sur la reconnaissance des symptômes caractéristiques d'un déficit magnésien, par des indications sur les méthodes correctives applicables, soit aux sols (amendements calco-magnésiens ou engrais magnésiens), soit aux arbres (pulvérisations de sels magnésiens).

Des études de cytologie ont établi un parallèle entre les symptômes macroscopiques liés à des variations de la nutrition minérale et les modifications morphologiques observées dans la cellule. Les divers types de carences examinés induisent au niveau des organites des changements spécifiques (MARINOS, 1963), mais la structure des chloroplastes semble toujours atteinte comme le montrent les travaux réalisés par THOMSON et WEIER (1962), HEWITT et HUCKLESBY (1963), POSSINGHAM, VESK et MERCER (1964), ainsi que ceux de THOMSON, WEIER et DREVER (1964) et de WHATLEY (1971). En général, une activité photosynthétique réduite est la conséquence d'un système lamellaire altéré, ce qui témoigne de relations très significatives entre structures et fonctions chloroplastiques (HALL et coll., 1972).

Les études cytologiques effectuées jusqu'ici ont surtout concerné les plantes annuelles. Nos travaux ont porté sur des pommiers recevant une alimentation normale ou déficiente en magnésium et nous avons envisagé les effets d'une carence relative en cet élément en examinant leur aspect agronomique aussi bien que leurs conséquences cytologiques.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. 1. — *Techniques de cultures*

Les études ont été conduites sur un sol constitué par du sable quartzeux contenu dans des fûts métalliques (d'une capacité de 212 litres) dont la paroi intérieure est revêtue d'une résine protectrice, polyester A 250, résistante à la corrosion des solutions salines mises à son contact (fig. 1). Un isolant thermique, le polystyrène expansé, protège la surface externe des récipients et réduit les écarts de température au niveau racinaire. La fourniture des éléments est assurée automatiquement par apport périodique des solutions nutritives à la surface du sable. Un réservoir situé à la partie inférieure du bac de culture recueille par gravité les liquides de drainage ; ceux-ci sont analysés pour établir les bilans d'absorption des arbres au cours de leur cycle de développement. On procède tous les huit jours à un renouvellement total des solutions nutritives.

1. 2. — *Protocoles des études*

Commencé en 1968, l'essai comporte 12 pommiers, cultivar *Golden delicious*, greffés sur franc, répartis en 4 lots de 3 arbres soumis à 4 niveaux alimentaires différents en calcium et en magnésium. Les arbres reçoivent en outre, à des niveaux convenables, les macroéléments et les microéléments nécessaires à leur alimentation (tabl. 1 et 2). On voit que la somme des cations comme celle des anions est la même (cf. tabl. 1). Dans un but de simplification, nous ferons actuellement état des seuls résultats recueillis en 1972 concernant les arbres âgés de 4 ans,

TABLEAU I

Composition des solutions nutritives en macroéléments
(milliéquivalents par litre)

	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	NH^{4+}	Total
Formule 1. — *Milieu de référence*						
NO^{3-}	3,5	2,75	1,25	0,25	1	8,75
PO^4H^{2-}	/	/	/	/	1	1
SO^{4--}	/	/	2	/	/	2
Cl^-	/	0,5	/	/	/	0,5
Total	3,5	3,25	3,25	0,25	2	12,25
Formule 2						
NO^{3-}	3,5	4	/	0,25	1	8,75
PO^4H^{2-}	/	/	/	/	1	1
SO^{4--}	/	/	2	/	/	2
Cl^-	/	0,5	/	/	/	0,5
Total	3,5	4,5	2	0,25	2	12,25
Formule 3						
NO^{3-}	2,5	5	/	0,25	1	8,75
PO^4H^{2-}	/	/	/	/	1	1
SO^{4--}	1	/	1	/	/	2
Cl^-	/	0,5	/	/	/	0,5
Total	3,5	5,5	1	0,25	2	12,25
Formule 4. — *Milieu carencé en magnésium*						
NO^{3-}	2,1	5,4	/	0,25	1	8,75
PO^4H^{2-}	/	/	/	/	1	1
SO^{4--}	1,4	/	0,6	/	/	2,0
Cl^-	/	0,5	/	/	/	0,5
Total	3,5	5,9	0,6	0,25	2	12,25

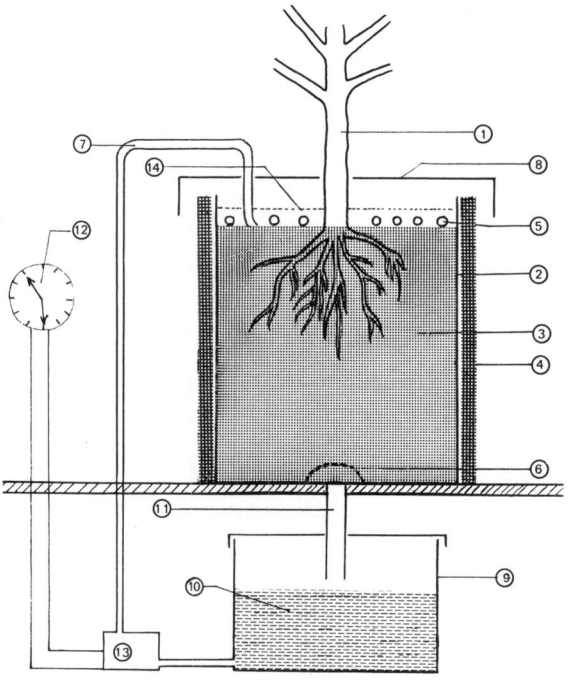


FIG. 1. — *Schéma du dispositif expérimental de culture des pommiers*

1 : Pommier
2 : Bac de culture
3 : Sable de culture
4 : Isolant thermique
5 : Distributeur d'eau
6 : Crépine plastique
7 : Tuyau de refoulement
8 : Couvercle du bac
9 : Bac de stockage
10 : Solution nutritive
11 : Tuyau de drainage
12 : Minuterie
13 : Pompe refoulante
14 : Film plastique.

TABLEAU 2

Concentration des solutions nutritives en oligo-éléments

mg/l		Sels apportés
Bore	0,325	Acide borique
Manganèse	0,330	Chlorure de Manganèse
Cuivre	0,013	Sulfate de cuivre
Zinc.....	0,0325	Sulfate de zinc
Molybdène	0,017	Molybdate d'ammonium
Fer	0,721	Éthylène diamine di-(o-hydroxyphenylacétate) de fer et de sodium

alimentés avec des solutions nutritives à teneur en magnésium moyenne (milieu de référence) ou faible (milieu carencé).

En 1971, dans les mêmes conditions, nous avons mis en place une deuxième culture (12 arbres) du même cultivar greffé sur Malling Morton 106 afin de contrôler nos premières observations.

1. 3. — *Prélèvement des feuilles et techniques d'études microscopiques*

A la mi-mai, alors qu'apparaissaient, chez les arbres sous-alimentés en magnésium, les symptômes caractéristiques d'une déficience en cet élément, des feuilles, alors âgées d'une quarantaine de jours, ont été cueillies le matin, vers 9 heures, sur les pommiers témoins et les pommiers carencés. La température était de 12°C, l'éclairement atteignant 6 cal cm^{-2} m^{-1}. Parmi les feuilles provenant des arbres souffrant de malnutrition, certaines présentaient les symptômes de carence, les autres étaient encore saines en apparence. Il s'agissait, dans tous les cas, de feuilles de rangs 5 et 6, comptées à partir de la base des pousses de l'année. Dans les feuilles chlorosées des pommiers carencés, les tissus destinés à l'examen microscopique ont été prélevés de part et d'autre de la nervure principale, au niveau de taches nécrotiques, de parties jaunissantes et de zones encore nettement chlorophylliennes ; ils ont toujours été pris le plus près possible de l'extrémité du limbe et ont été comparés à des échantillons analogues provenant soit de feuilles de pommiers témoins, soit de feuilles apparemment saines de pommiers carencés.

Le matériel a été fixé pendant 2 heures au glutéraldéhyde à 4 p. 100 (tampon cacodylate de sodium pH 7,5) et post-fixé 1 heure à l'acide osmique à 2 p. 100. Il a été ensuite inclus dans l'araldite après déshydratation à l'alcool puis à l'oxyde de propylène. Les coupes, contrastées au citrate de plomb et à l'acétate d'uranyle, ont été examinées avec un microscope électronique JEM 100. Nos observations ont porté sur les cellules du parenchyme palissadique.

2. — RÉSULTATS AGRONOMIQUES

Nous nous limiterons dans cet article à énumérer les principales observations et mesures qui ont été réalisées à l'échelle macroscopique.

Dès la première année, on assiste à l'apparition des symptômes de déficience chez les arbres soumis aux conditions nutritives de la formule 4. Vers la mi-mai,

TABLEAU 3

Influence de la nutrition magnésienne sur la formation des corymbes et la production des fruits par arbre

	Nombre de corymbes par arbre		Nombre de fruits par arbre			
Années	1972		1971	1972	1972	1973
Porte greffe	Franc	MM 106	Franc	Franc	MM 106	MM 106
Milieu de référence	400*	121 ± 4	34 ± 20	207*	116 ± 32	160 ± 20
Milieu carencé en magnésium	233*	96 ± 4	7 ± 4	12*	52 ± 2	26 ± 8

* Les comptages ont été faits globalement.

ces symptômes se traduisent par des taches nécrotiques dispersées sur le limbe et par une décoloration progressive des tissus foliaires. L'évolution se poursuit par un jaunissement des bords du limbe et par l'apparition de nécroses marginales ou internervaires. Les feuilles atteintes tombent prématurément.

Au cours des années successives, le dégarnissement caractéristique des rameaux à partir de la base et la diminution de la surface foliaire s'accentuent chez les arbres mal nourris en magnésium. Soulignons du reste que les accidents ne se limitent pas aux seules feuilles. En 1972, nous avons également procédé à un contrôle du nombre de corymbes formés par arbre. Ce nombre est réduit de façon notable par la déficience magnésienne comme l'indique le tableau 3. Ce phénomène se traduit par une forte décroissance du nombre de fruits. La morphologie des pommes, dont le poids moyen est plus faible, se modifie progressivement (fig. 2). Une dissymétrie par rapport à un plan passant par le pédoncule et la cavité calicinale se manifeste.

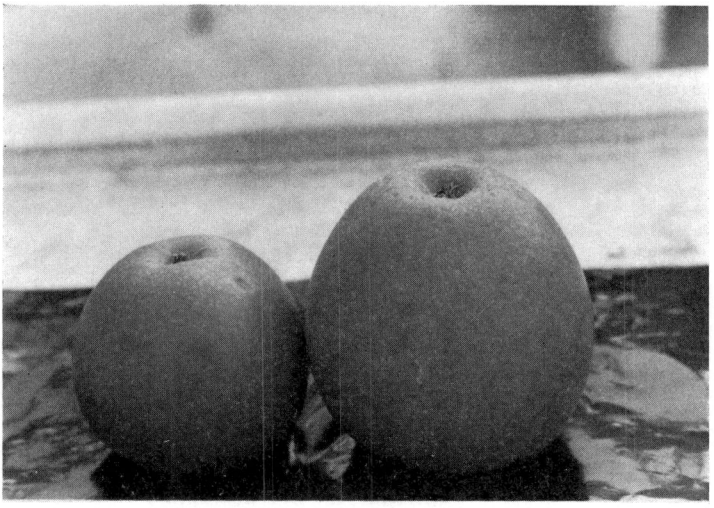


FIG. 2. — A gauche, *la pomme, cueillie sur un pommier carencé, est de petite taille et de forme aplatie.* A droite, *un fruit provenant d'un arbre normalement alimenté*

Parallèlement, l'analyse de feuilles de rangs 5 et 6, prélevées chaque année au mois de juillet, a confirmé l'existence d'une carence magnésienne partielle chez les arbres alimentés avec la solution n° 4. Ainsi, des analyses faites le 28 juillet 1972 sur des arbres de 4 ans ont montré que la teneur en magnésium des feuilles est passée de 25 meq pour 100 grammes de matière sèche chez les arbres témoins à 7,2 meq chez les sujets carencés.

Il paraissait intéressant de compléter les résultats d'ordre agronomique qui caractérisent le déficit magnésien du pommier, par une étude des perturbations qui l'accompagnent au niveau cellulaire.

3. — ÉTUDE CYTOLOGIQUE

3. 1. — *Évolution des organites dans la feuille de pommier carencé : Résultats et discussion*

Ce prélèvement de la mi-mai, effectué au moment de l'apparition des symptômes foliaires chez les pommiers partiellement privés de magnésium, témoigne chez ces derniers d'une évolution déjà très avancée des divers organites ; les structures des éléments cellulaires sont, en effet, fortement liées à l'état physiologique de la plante et leurs variations indiquent avec fidélité si telle modification du milieu lui convient ou lui est néfaste. Il convient d'ores et déjà de signaler que les modifications ultrastructurales induites par la carence magnésienne s'observent dans les feuilles atteintes non seulement au niveau des taches nécrotiques et des parties jaunissantes, mais aussi dans les zones du limbe apparemment indemnes. Nous les avons retrouvées d'ailleurs dans les feuilles des pommiers carencés ne présentant pas de symptômes caractéristiques. Des changements assez remarquables affectent entre autres les structures plastidales. Chez les chloroplastes des feuilles prélevées sur les arbres témoins (Pl. I, fig. 3 et 4), des thylakoïdes à contenu clair traversent un stroma dense. Les granums sont constitués par des empilements irréguliers de disques granaires. Des vésicules claires (v) se forment à la périphérie de l'organite par invagination du feuillet interne de l'enveloppe plastidale ; elles peuvent s'enfoncer dans le stroma ; parfois elles s'allongent en un tube court, et sans doute, par leur alignement et leur coalescence, peuvent-elles donner naissance à de nouvelles lamelles du type habituel avec un espace central transparent aux électrons.

Dans les feuilles des pommiers carencés, les structures lamellaires des plastes se modifient, ce qui correspond vraisemblablement à un remaniement du matériel lamellaire (Pl. II, fig. 5). Les thylakoïdes granaires et intergranaires sont bordés par une bande étroite peu colorée par l'osmium tandis que leur espace central est devenu fortement opaque aux électrons. La limite entre les disques granaires est alors marquée par une ligne très fortement osmiophile comprise entre deux bandes étroites peu colorées par l'osmium. Des vésicules claires (v), probablement issues du feuillet interne de l'enveloppe plastidale, apparaissent à la périphérie de l'organite (Pl. II, fig. 5) ; certaines peuvent se transformer en un tube clair et court ou s'enfoncer dans le stroma (Pl. II, fig. 5). On observe parfois, dans les chloroplastes, des saccules plus ou moins longs, dilatés, très transparents aux électrons (Pl. II, fig. 6), et peut-être, les vésicules claires sont-elles à l'origine de telles formations. De rares images montrent des vésicules alignées en relation avec une structure qui pourrait être interprétée comme un corps prolamellaire (Pl. III, fig. 7). Ainsi peuvent coexister dans le même organite deux sortes de lamelles, l'une à contenu clair, l'autre correspondant aux thylakoïdes modifiés dont l'espace central, devenu opaque aux électrons, est bordé par un liseré clair et qui apparaissent en quelque sorte comme le négatif des premières (Pl. II, fig. 6).

Cette évolution des structures des plastes dans les feuilles de pommiers carencés en magnésium évoque assez les phénomènes de dégénérescence plastidale observés au cours de la tumorisation chez le *Datura stramonium* infesté par l'*Agrobacterium*

tumefasciens (PUISEUX-DAO et HOURSIANGOU NEMBRUM, 1966) ou les variations infrastructurales des chloroplastes des feuilles panachées de *Coleus hybrida* (MARTY, 1968). Dans les feuilles de tournesol virosées, ARNOTT et SMITH (1967) ont aussi observé une modification du système lamellaire dont les saccules granaires gonflent et accumulent un matériel dense aux électrons tandis que le stroma s'enrichit en globules osmiophiles.

Dans la feuille de pommier carencé en magnésium, d'autres structures correspondent, selon toute vraisemblance, à des stades plus avancés de désorganisation lamellaire. Les empilements de disques granaires deviennent moins réguliers et les partitions ont tendance à s'effacer. Les granums se déforment mais demeurent encore discernables (Pl. III, fig. 8).

Puis, les disques granaires d'un même granum confluent entre eux. Il se forme ainsi, dans le stroma plastidal, sur l'emplacement des anciens granums, des plages plus claires, d'aspect très particulier, dans lesquelles l'arrangement initial en disques superposés n'est plus du tout reconnaissable (Pl. III, fig. 8).

L'évolution des divers chloroplastes et celle des différents granums à l'intérieur d'un même organite ne sont pas synchrones. Parfois certains empilements de disques granaires se distinguent encore tandis que d'autres sont déjà réduits à l'état de plages membranaires.

Dans le même temps que le système lamellaire se modifie, des globules vraisemblablement lipidiques (gl) apparaissent dans le stroma et, sur certaines coupes, ils sont nombreux et volumineux (Pl. III, fig. 8) ; ils n'apparaissent pas colorés sur la plupart de nos photographies, ou le sont peu ; ils ne le sont pas non plus du reste sur celles de HALL *et al.* (1972) dans leurs études cytologiques de la carence magnésienne chez le maïs ; mais, dans notre cas, la coloration que révèle une post-fixation prolongée à l'acide osmique (24 heures) confirme la nature lipidique de ces globules (Pl. IV, fig. 9). HEWITT et HUCKLESBY (1963) ainsi que HALL *et al.* (1972) avaient aussi observé que la carence magnésienne induit une formation abondante de globules lipidiques à partir des structures plastidales désorganisées. D'ailleurs, ce développement inhabituel de globules osmiophiles de taille importante concomitant à la disparition du système lamellaire n'est pas spécifique des carences mais s'observe aussi en fin de différenciation des chloroplastes en chromoplastes (LANCE-NOUGARÈDE, 1960 ; CATESSON, 1970). Dans la feuille de pommier carencé en magnésium, la présence de globules volumineux suit la modification du système thylakoïdal initial et, par conséquent, coïncide avec la désorganisation des structures.

Dans les feuilles de pommier carencé en magnésium, on observe dans certains chloroplastes en voie de dégénérescence, des sortes d'inclusions de dimensions variables, parfois assez volumineuses, de forme sphérique, qui paraissent constituées par des amas désorganisés de lamelles, et l'on peut se demander si elles ne proviennent pas de la confluence dans le stroma d'une partie des plages lamellaires issues de la transformation des anciens granums (Pl. IV, fig. 10 et Pl. V, fig. 11). Toutefois, leur ressemblance avec certaines mitochondries dégénérées et les rapports topologiques souvent observés entre plastes et mitochondries laissent planer un doute sur cette interprétation. Pourtant, CATESSON (1970) a observé un processus identique au cours de la maturation de la pomme, lors de la transformation des chloroplastes de l'épiderme et des assises superficielles du péricarpe en chromoplastes.

Une modification des thylakoïdes, analogue à celle que nous venons de décrire, précède la désorganisation des structures primitives et leur rassemblement en une inclusion dense. Remarquons qu'il s'agit, dans ce cas comme dans celui qui nous intéresse, d'une disparition du système lamellaire en relation avec une perte de chlorophylle. En effet, les dosages de ce pigment, réalisés selon la technique de McKINNEY (1941), montrent une diminution importante de la teneur en chlorophylles des feuilles des pommiers carencés en magnésium par rapport à celle des témoins. Par exemple, dès l'apparition des premiers symptômes foliaires, le taux en chlorophylles passe de 6 500 microgrammes par g de feuilles sèches chez les pommiers recevant une alimentation normale, à 2 400 microgrammes chez ceux souffrant d'un apport magnésien insuffisant.

Ce processus de dédifférenciation du chloroplaste par la désorganisation progressive et la confluence du système lamellaire en une inclusion dans le stroma plastidal apparaît comme l'inverse de celui de la différenciation des thylakoïdes dans le proplaste par l'intermédiaire d'un corps pré-thylakoïdal dans lequel se rassemble d'abord le matériel qui servira à l'édification des lamelles. Ces inclusions denses ont été décrites par divers auteurs dans des tissus méristématiques variés comme les apex de fougère (MICHAUX, 1968), de tabac (STETTLER et LAETSCH, 1969), les points végétatifs de pêcher (FLEMION *et al.*, 1967), les bourgeons de Pomme de terre (MARINOS, 1967), les méristèmes radiculaires de Fève (NEWCOMB, 1967)... L'inclusion observée en mai dans les plastes des feuilles des pommiers carencés pourrait être considérée comme un corps intermédiaire « post-thylakoïdal ».

Nous avons déjà observé que la carence calcique totale induit aussi, chez la Pariétaire (DURAND et CHEVALIER, 1969 ; CHEVALIER, 1975), une modification des thylakoïdes analogue à celle que nous venons de décrire et la formation dans le stroma plastidal d'inclusions volumineuses entourées d'une membrane simple. Ces dernières, toutefois, ne proviennent pas de la désorganisation des lamelles déjà existantes comme c'est le cas chez le Pommier, mais sont constituées par le matériel qui aurait dû servir à édifier la partie du système thylakoïdal non différenciée à cause de l'inhibition créée par l'absence de calcium. Néanmoins, la formation d'une inclusion dans laquelle se rassemble, en totalité ou en partie, le matériel lamellaire qui va être différencié, ou n'a pu l'être, ou qui résulte d'une dédifférenciation, semble ressortir d'un même phénomène et l'on peut se demander s'il existe des potentialités de réversibilité dans ce système.

En même temps que les chloroplastes, les mitochondries évoluent et leurs structures dégénèrent. Par la désorganisation progressive de leurs crêtes, elles prennent peu à peu l'apparence d'amas de membranes semblables aux plages lamellaires qui, à l'intérieur du stroma plastidal, ont succédé aux granums (Pl. VI, fig. 12 et 13). A certains stades, des relations topologiques peuvent exister entre les plastes et les mitochondries qui sont parfois étroitement accolés et traduisent sans doute des rapports physiologiques entre ces deux types d'organites (Pl. VII, fig. 14).

Le noyau semble rarement atteint par la carence magnésienne. Il arrive toutefois que les deux feuillets de l'enveloppe s'écartent l'un de l'autre, formant des boursouflures entre les pores (Pl. IV, fig. 9).

Cette évolution des ultrastructures dans la feuille du pommier carencé n'est pas localisée au seul niveau des taches nécrotiques, mais se retrouve dans les parties

vertes et même dans les feuilles encore saines en apparence ; elle précède, par conséquent, l'apparition des symptômes macroscopiques et, si elle est caractéristique de la carence en magnésium, son observation pourrait constituer un test assez précoce pour déceler la carence.

CONCLUSION

La perte précoce d'une partie du feuillage au début de l'été atteint les pommiers qui souffrent d'une insuffisance magnésienne ; à un nombre relativement réduit de corymbes correspond une faible production de fruits. La carence, même partielle, en magnésium a donc de graves conséquences d'ordre agronomique.

D'autre part, les observations ultrastructurales mettent en relief l'extraordinaire plasticité des chloroplastes ; ces organites s'avèrent très sensibles à ce qui perturbe la vie de la cellule et répondent par des modifications de structures aux variations néfastes du milieu. La formation d'une inclusion intraplastidale dans laquelle s'accumule le matériel qui résulte de la désorganisation des lamelles suggère des potentialités de dédifférenciation et de redifférenciation du système thylakoïdal. La carence magnésienne entraîne également la dégénérescence des crêtes mitochondriales. Ainsi, chez les feuilles adultes des pommiers carencés, il existe une évolution importante des ultrastructures qui précède l'apparition des symptômes macroscopiques caractéristiques puisqu'elle se retrouve dans les feuilles encore saines en apparence. L'observation des modifications des organites cellulaires pourrait, de ce fait, permettre de déceler de façon précoce la carence.

Reçu pour publication en septembre 1975.

SUMMARY

MAGNESIUM DEFICIENCY EFFECTS ON APPLE-TREES.
ULTRASTRUCTURAL EVOLUTION IN DEFICIENT LEAVES OF APPLE-TREES

In case of a partial magnesium deficiency, a singular ultrastructural evolution in apple-trees leaves lends to cells degeneration and death. Modifications of the organelles precede macroscopic symptoms and can be an early deficiency test.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG EINES MANGEL AN MAGNESIUM BEIM APFELBAUM
ENTWICKLUNG DER ULTRASTRUKTUREN
IN DEN BLÄTTEN VON MANGELNDEN APFELBÄUMEN

Die besondere Entwicklung der Ultrastrukturen in den Blättern des Apfelbaumes, denen teilweise Magnesium entzogen wurde, führt zur Degenerierung der Zellen und zu deren Tod. Die Umwandlung verschiedener Organite geht dem Auftreten makroskopischer Symptome voraus und kann *einen vorzeitigen* Test für den Mangel darstellen.

РЕЗЮМЕ

Действие недостаточности магния на яблоню. — Эволюция ультраструктуры листа яблони страдающей от недостаточности магния.

СИМОНА ШЕВАЛЬЕ, КЛАРА ХЮГЕ.

Совершенно особая эволюция ультраструктур яблонного листа деревьев частично лишенных магния, заканчивается вырождением клеток и их гибелью. Изменения различных органов листа начинаются до появления макроскопических симптомов, и, возможно, что наблюдения за этими изменениями смогут служить ранним тестом магниевой недостаточности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOTT H. J., SMITH K. M., 1967. Electron microscopy of virus infected Sunflower leaves. *J. Ultrastructure Res.*, **19**, 173-195.

BLANCHET R., 1954. Observations sur la carence magnésienne du pommier. *Ann. agron.*, **1**, 119-128.

BOYNTON D., BURRELL A., 1944. Potassium induced magnesium deficiency in the Mac Intosh apple tree. *Soil Sci.*, **58**, 441-454.

CATESSON A. M., 1970. Évolution des plastes de pomme au cours de la maturation du fruit. Modifications ultrastructurales et accumulation de ferritine. *J. Microscopie*,, **9** 949-974.

CHEVALIER S., 1975. Effets de la carence calcique et de la levée de carence sur les ultrastructures chloroplastiques chez *Parietaria officinalis* L. (non publié).

DURAND M., CHEVALIER S., 1969. Étude de l'action de la carence calcique sur la structure du méristème caulinaire et des premières feuilles du *Parietaria officinalis* L. *C. R. Acad. Sci.*, **269**, 48-50.

FLEMION F., DENGLER N. G. et STEWART K. D., 1967. Ultrastructure of the shoot apices and leaves of normal and physiologically dwarfed peach seadlings. I. Plastid development. *Contrib. Boyce Thompson Inst. Plant. Res.*, **23**, 331-344.

HALL J. D., BARR R., ABBAS H. A. L., CRANE F. M., 1972. The ultrastructure of chloroplasts in mineral deficient maïze leaves. *Plant Physiol.*, **50**, 404-409.

HEWITT E. J., HUCKLESBY, 1963. Non publié. Cité par HEWITT dans *Plant Physiology* de STEWART (Ac. Press), **3**, 175.

LANCE-NOUGARÈDE A., 1960. Développement inframicroscopique des chromoplastes au cours de l'ontogenèse des fleurs ligulées de *Chrysanthemum segetum* L. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 173-175.

MCKINNEY G., 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *J. Biol. Chem.*, **140**, 315-322.

MARINOS N. G., 1963. Studies on submicroscopic aspects of mineral deficiencies. *Amer. J. Bot.*, **50**, 998-1005.

MARINOS N. G., 1967. Multifunctional plastids in the meristematic region of potato tuber buds. *J. Ultrastructure Res.*, **17**, 91-113.

MARTY D., 1968. Variations infrastructurales dans les chloroplastes des feuilles panachées de *Coleus hybrida*. *Ann. Sci. Bot.*, 12e série, **9**, 575-608.

MICHAUX N., 1968. Étude cytologique du méristème apical du *Pteris cretica* L. *C. R. Acad. Sc.*, **267**, 1442-1444.

NEWCOMB E. H., 1967. Fine structure of protein. Storing plastids in Bean root tips. *J. Cell. Biol.*, **33**, 143-163.

POSSINGHAM J. V., VESK M., MERCER F. V., 1964. The fine structure of leaf cells of manganese deficient spinach. *J. Ultrastructure Res.*, **11**, 68-83.

PUISEUX-DAO S., HOURSIANGOU MEMBRUN D., 1966. Étude de l'évolution des plastes au cours de la tumorisation chez le *Datura stramonium*, Solanacées, infesté par l'*Agrobacterium tumefaciens*. *6th International Congress for Electron microscopy*, Maruzen Co, Ed., Kyoto, 331-332.

STETTLER D. A., LAETSCH W. M., 1969. Chloroplast development in *Nicotiana tabacum* « Maryland Mammoth ». *Amer. J. Bot.*, **56**, 260-270.

THOMSON W. W., WEIER T. E., 1962. The fine structure of chloroplasts from mineral deficient leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Amer. J. Bot.*, **49**, 1047-1055.

THOMSON W. W., WEIER T. E., DREVER H., 1964. Electron microscopic studies on chloroplasts from phosphorus deficient plants. *Amer. J. Bot.*, **51**, 933-938.

TROCMÉ S., GRAS R., 1964. *Sol et fertilisation en arboriculture fruitière*, éditeur G. M. PERRIN, 157-164.

WALLACE T., 1930. The effects of deficiencies of potassium, calcium and magnesium respectively on the contents of these elements and of phosphorus in the shoot and trunk regions of apple trees. *J. Pomol. and Hort. Sci.*, **18**, 23-43.

WALLACE T., 1951. *The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms*. His Majesty's Stationnary Office.

WHATLEY J. M., 1971. Ultrastructural changes in chloroplasts of *Phaseolus vulgaris* during development under conditions of nutrient deficiency. *New Phytol.*, **70**, 725-742.

PLANCHE I

FIG. 3

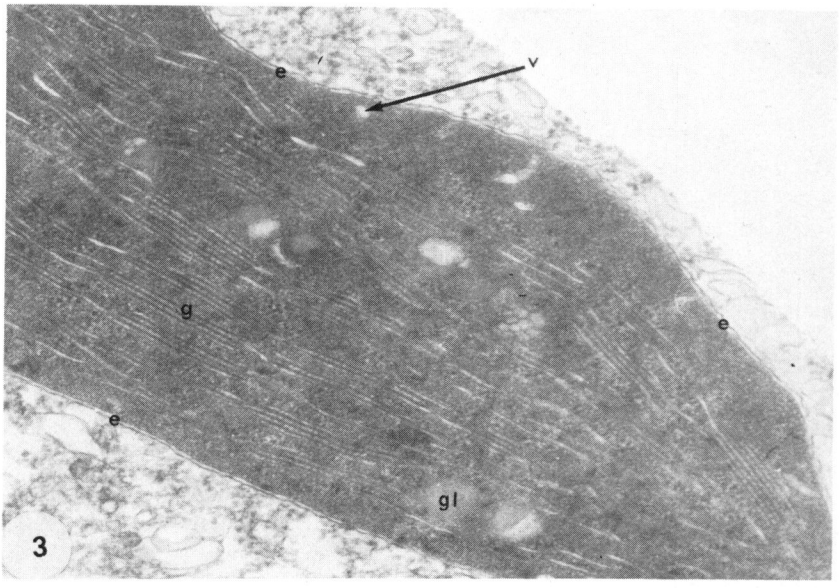
Ce chloroplaste de feuille de pommier normalement a imenté présente dans un stroma assez dense des thylakoïdes dont l'espace central est transparent aux électrons. (× 36 000).

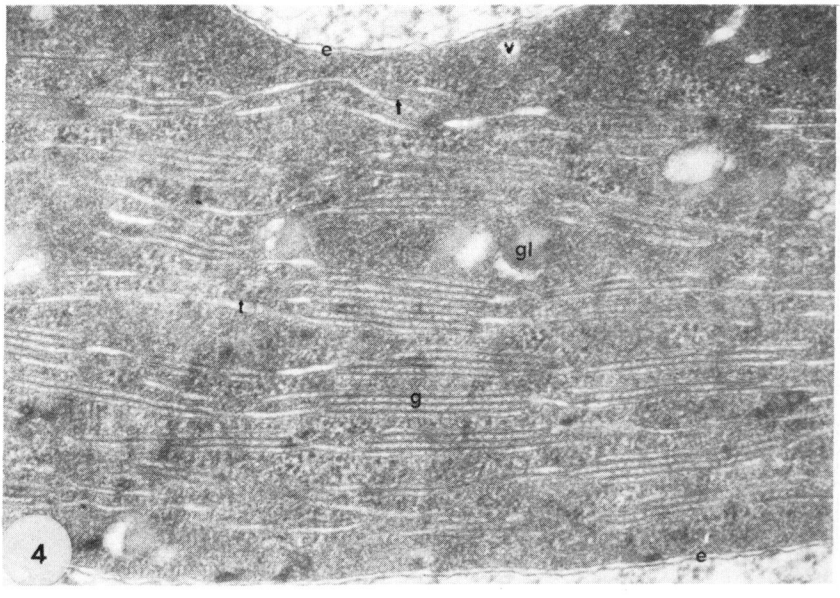
FIG. 4

Une partie d'un chloroplaste de feuille de pommier témoin à un plus fort grandissement (× 50 000).

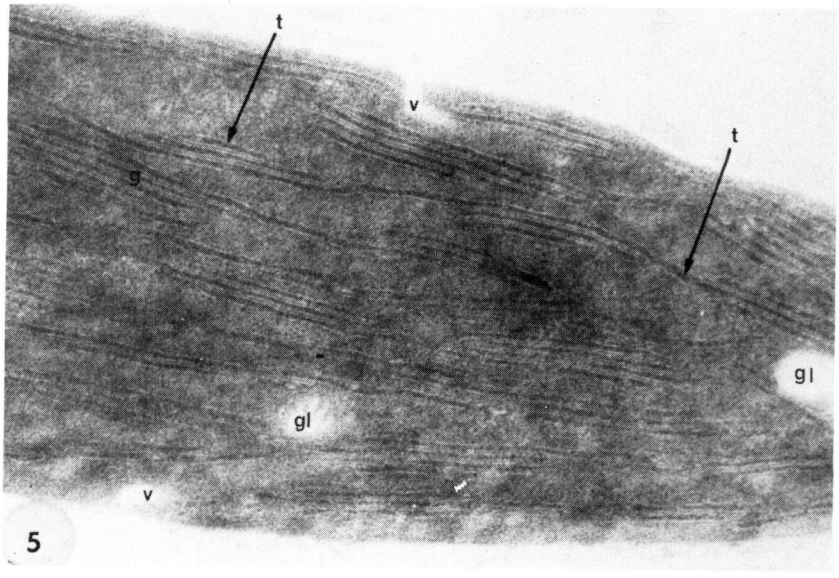
Abréviations

e : enveloppe plastidale
g : granum
gl : globule lipidique
v : vésicule claire
t : thylakoïde





Simone CHEVALIER et Claire HUGUET


t
v
t
g
gl
gl
v
5

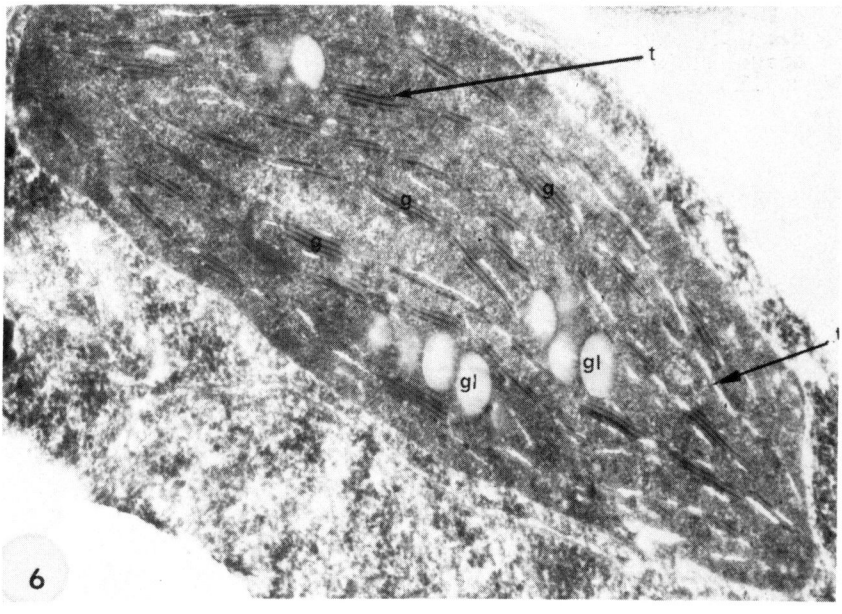

t
g
g
g
gl
gl
6

PLANCHE III

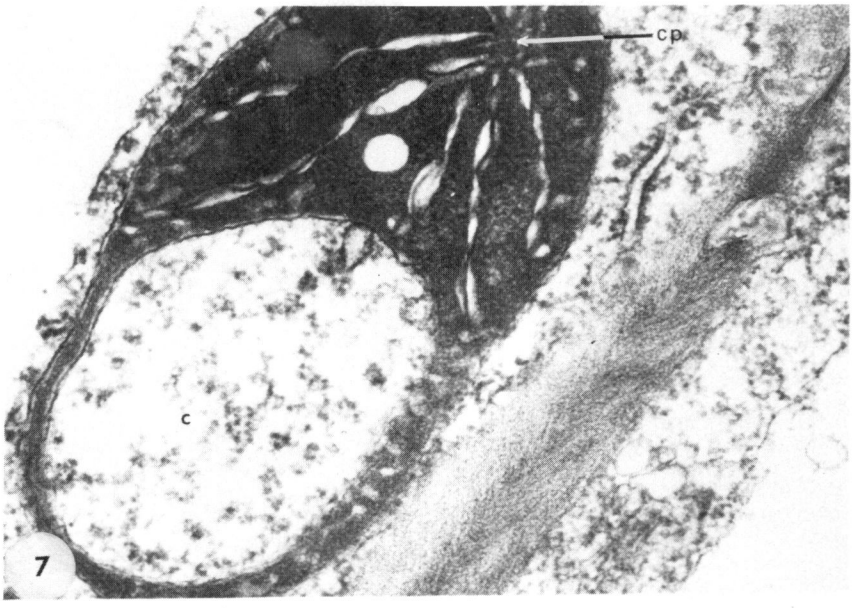
FIG. 7

Dans ce chloroplaste de feuille de pommier carencé, des vésicules claires sont alignées et en relation avec une formation qui correspond peut-être à un reste de corps prolamellaire. × 30.000.

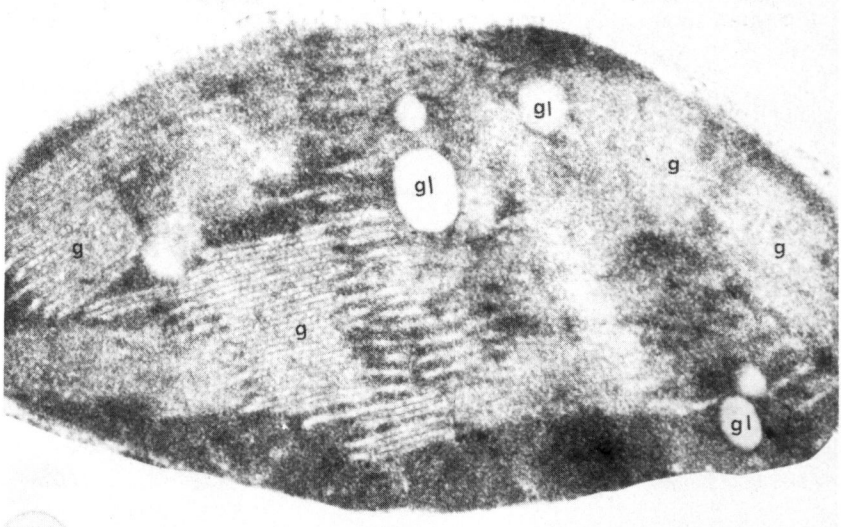
FIG. 8

Dans ce chloroplaste de feuille de pommier carencé, les disques granaires d'un même granum se déforment et confluent mais certains granums présentent encore un aspect normal. Des globules lipidiques (non colorés sur cette photographie) apparaissent dans le stroma. × 27.000.

c : enclave de cytoplasme
cp : corps prolamellaire
g : granum
gl : globule lipidique.



7



8

PLANCHE IV

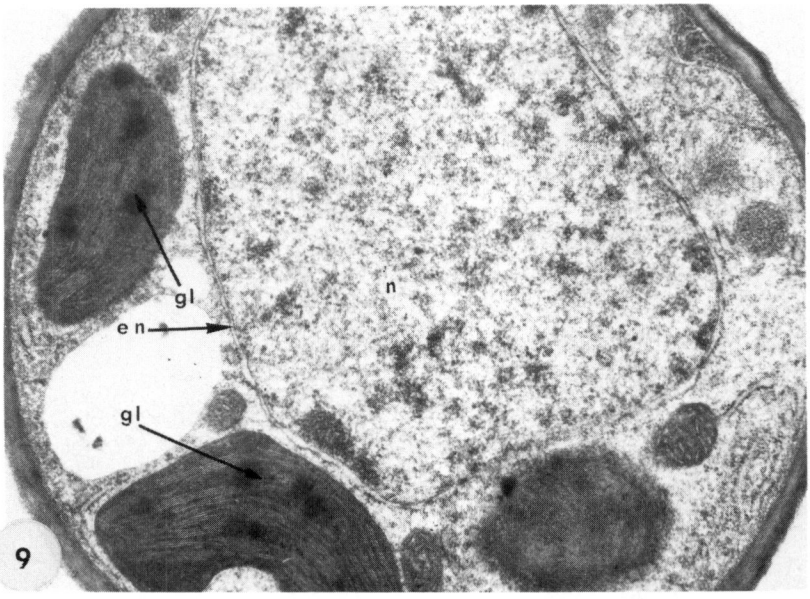
Fig. 9

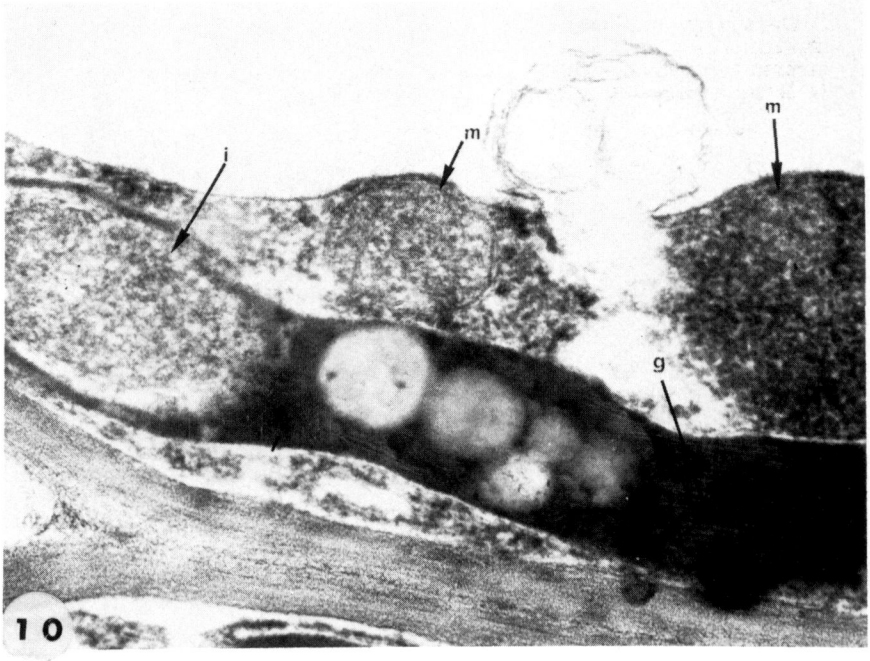
Après une post-coloration prolongée à l'acide osmique (24 h) les globules lipidiques dans les chloroplastes de cette cellule, apparaissent colorés. Sous l'influence de la carence, les deux feuillets de l'enveloppe nucléaire s'écartent l'un de l'autre formant des boursouflures entre les pores. × 6.700.

Fig. 10

Dans ce chloroplaste d'une feuille de pommier carencé, un volumineux amas désorganisé de membranes s'est constitué dans le stroma tandis que d'autres, de plus faibles dimensions, semblent se former. × 26.000.

n : noyau
en : enveloppe nucléaire
gl : globule lipidique
g : granum
i : inclusion intraplastidale
m : mitochondrie.





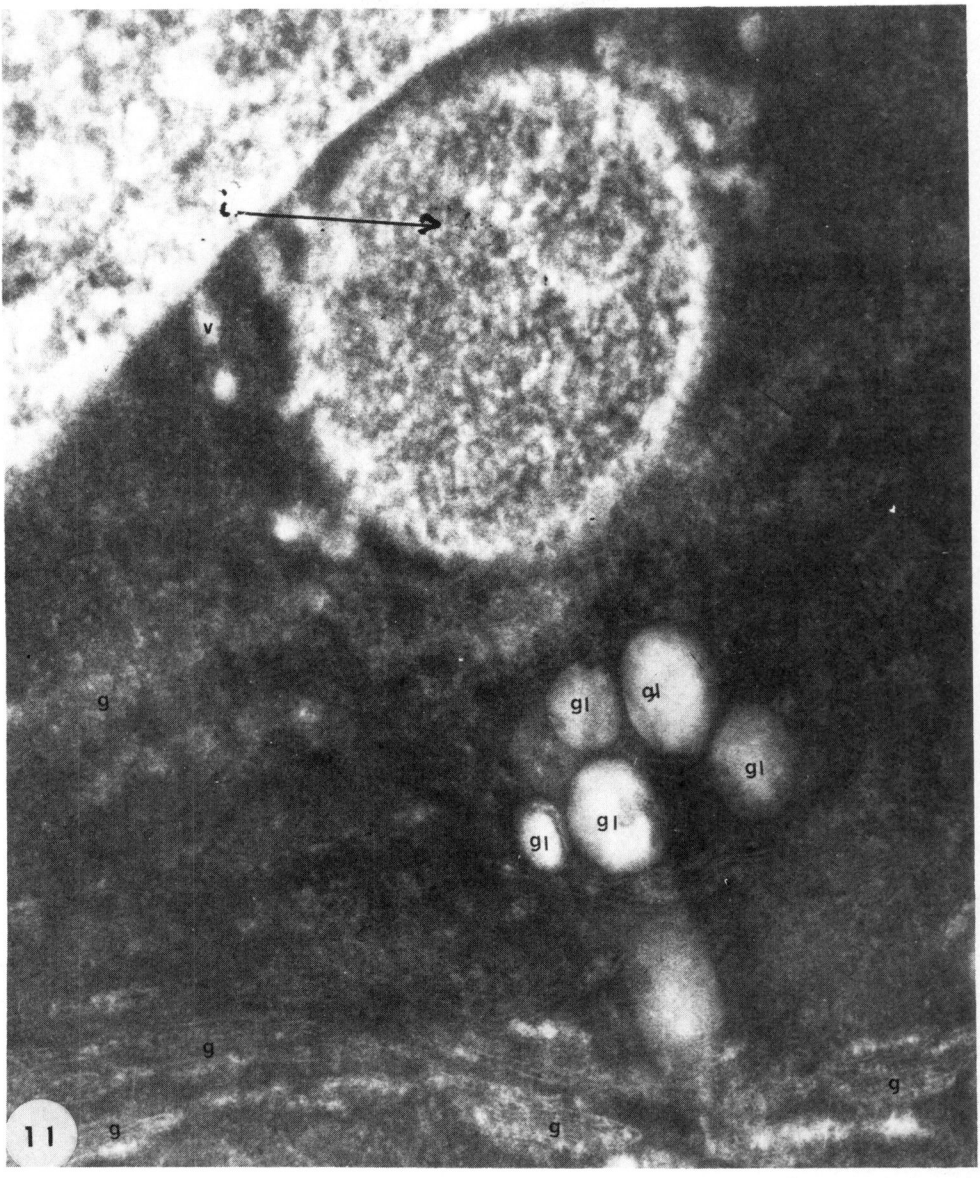
Simone CHEVALIER et Claire HUGUET

PLANCHE V

FIG. 11

A un plus fort grandissement, une formation analogue constituée par un amas désorganisé de lamelles dans le stroma d'un chloroplaste de feuille de pommier carencé. × 140.000.

g : granum
gl : globule lipidique
i : inclusion intraplastidale
v : vésicule claire.



Simone CHEVALIER et Claire HUGUET

PLANCHE VI

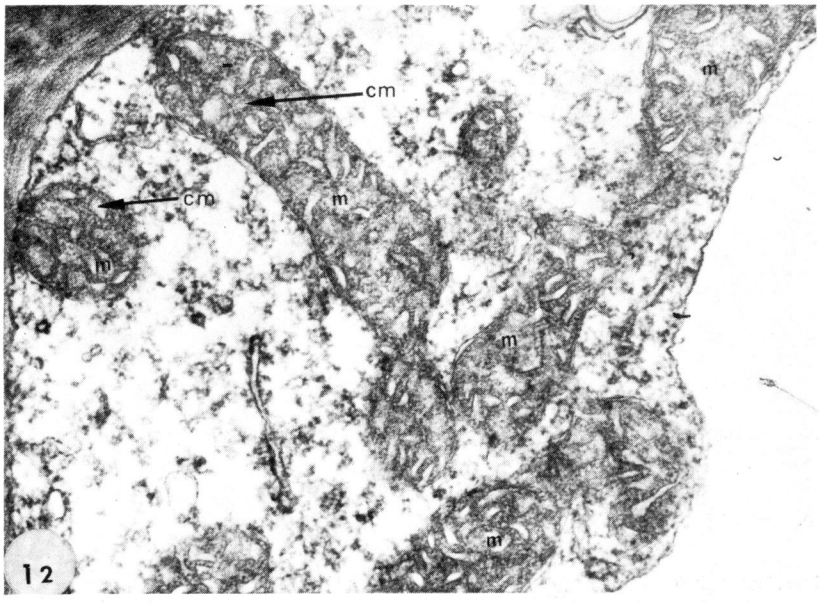
FIG. 12

Les mitochondries des feuilles des arbres témoins présentent des crêtes bien développées. × 27.000.

FIG. 13

Dans les feuilles de pommier carencé les crêtes mitochondriales se désorganisent. × 28.000.

m : mitochondrie
cm : crête mitochondriale.


cm
cm
m
m
m
m
m
12

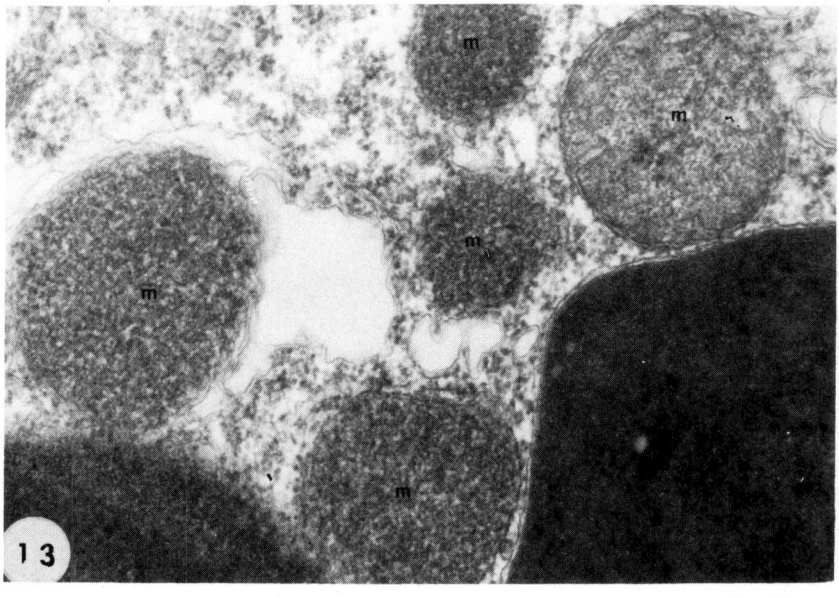
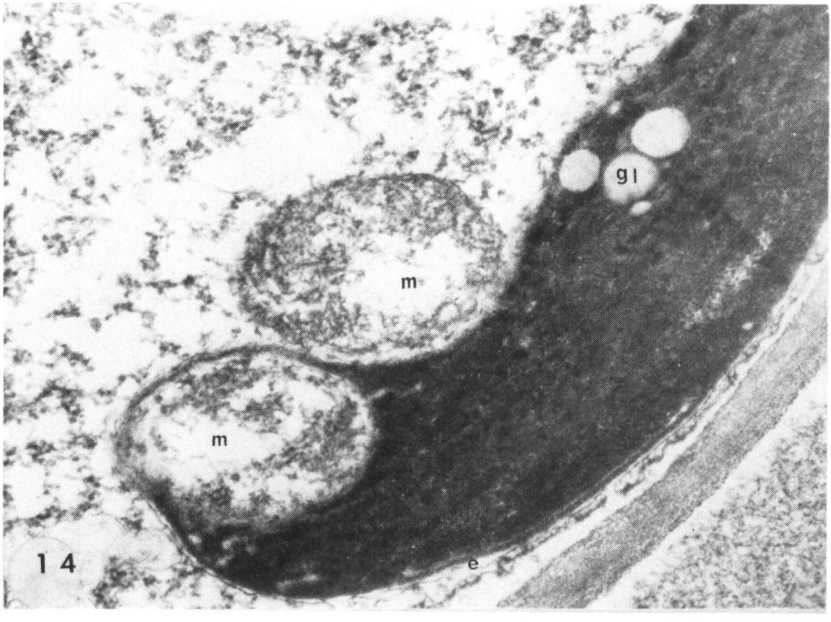

m
m
m
m
m
13

PLANCHE VII

FIG. 14

Ce plaste et ces mitochondries présentent ici des rapports topographiques étroits (feuille de pommier carencé). × 56.000.

m : mitochondrie
gl : globule lipidique
e : enveloppe plastidale.


gl
m
m
14
e

Ann. agron., 1975, **26** (4), 363-399.

PRINCIPES DE DÉTERMINATION QUALITATIVE DES MINÉRAUX ARGILEUX A L'AIDE DES RAYONS X

Problèmes particuliers posés par les minéraux argileux les plus fréquents dans les sols des régions tempérées

M. ROBERT

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Cet article présente une méthode simple de détermination des argiles basée sur l'observation de la première réflexion basale et sur sa variation au cours de différents « tests de comportement ». Il comprend 3 parties :

La première dégage les principaux problèmes posés par l'application de la loi de Bragg à la détermination des minéraux présents dans la fraction argile des sols. La deuxième partie envisage plus particulièrement le cas des minéraux argileux 2/1 qui se révèlent les plus fréquents dans les sols des régions tempérées : les principales propriétés de ces minéraux pouvant être utilisées pour leur caractérisation sont passées en revue. La dernière partie présente enfin un schéma simple et quelques remarques sur la détermination des principales familles de minéraux argileux.

La diffraction des rayons X est la méthode de loin la plus employée pour l'identification des minéraux cristallisés. Elle revêt une importance particulière pour l'étude des minéraux de taille $< 2\ \mu$ qui ne sont pas aisément accessibles à d'autres moyens d'investigations. L'utilisation des rayons X est donc une pratique courante dans tous les laboratoires s'attachant à l'étude minéralogique des sols ou des sédiments.

L'objectif principal de cet article est de discuter quelques problèmes qui peuvent se poser lors de la détermination courante des minéraux argileux, en apportant quelques éléments fondamentaux qui permettent de mieux justifier l'utilité de certaines précautions concernant l'extraction et la préparation des argiles, ou l'emploi

de certains tests nécessaires à une bonne identification des minéraux (ROBERT et TESSIER, 1975).

Bien entendu, nous renvoyons aux ouvrages plus complets publiés en langue anglaise par BROWN (1961) et GRIM (1968), ou en français par CAILLÈRE et HÉNIN (1963), MILLOT (1964). De même, au sujet de la classification des argiles, nous renvoyons à la synthèse de PÉDRO (1965) et aux nombreuses mises au point qu'il a pu faire dans le Bulletin du Groupe Français des Argiles après chaque réunion du Comité de Nomenclature (A. I. P. E. A.). En ce qui concerne la théorie et la technique de la radiocristallographie nous renvoyons à GUINIER (1964). Signalons enfin qu'un ouvrage de THOREZ (1975) est actuellement sous presse (1).

I. — APPLICATION DE LA LOI DE BRAGG AUX MINÉRAUX DES SOLS

1. — *Généralités*

Rappelons que les structures cristallisées sont caractérisées par un arrangement périodique des atomes dans un réseau à 3 dimensions. Ces atomes sont répartis dans des plans, et les distances qui séparent ces plans sont caractéristiques des espèces cristallines.

Les rayons X ne sont qu'un rayonnement électromagnétique particulier qui est caractérisé, en ce qui nous concerne, par 2 propriétés essentielles :

— une longueur d'onde faible (0,5 à 2,5 Å), de l'ordre de grandeur des distances inter-atomiques, et des distances entre les plans atomiques des réseaux cristallins ; en conséquence, les structures cristallisées constituent un véritable réseau d'interférence pour les rayons X ;

— une énergie élevée ($W = h\nu$ de l'ordre de 10^4 électron volts), ce qui explique le fait que les rayons X ont un effet au niveau des couches électroniques des atomes situés dans la masse même de la matière. Cependant, l'action des rayons X n'intéresse qu'une épaisseur assez faible et il faut donc que la surface soit représentative de l'ensemble de l'échantillon.

a) L'effet d'un rayonnement X sur des composés cristallisés est complexe, et il se traduit tout d'abord par l'*émission de rayonnements secondaires*. Si l'effet Compton est en général négligeable, il n'en est pas de même de l'effet photoélectrique avec émission de rayonnement X de fluorescence (avec une longueur d'onde supérieure à celle du faisceau primaire) par l'échantillon lui-même. Un tube avec une anticathode au cuivre suscitera ainsi le rayonnement de fluorescence du fer. Pour ne pas avoir à déferrifier systématiquement les échantillons, la meilleure solution pour les études de minéralogie des sols est d'utiliser un tube au cobalt dont le rayonnement X ne provoquera pas cet effet de fluorescence.

b) Mais l'utilisation des rayons X en minéralogie est avant tout basée sur les *phénomènes de diffusion cohérente* des rayons X par les couches électroniques des atomes, sans qu'il y ait de changement de longueur d'onde : c'est ce que l'on appelle le phénomène de diffraction des rayons X, et la loi de Bragg en définit les conditions ($2\,d \sin\theta = n\lambda$).

(1) THOREZ J., 1975. *Phyllosilicates and clay minerals*. 558 p. Dison (Belgium).

Parmi les différentes méthodes cristallographiques possibles (LAUE, cristal tournant, DEBYE et SCHERRER), la dernière, souvent appelée méthode des poudres, est particulièrement favorable à l'étude des minéraux argileux pour lesquels il n'est pas possible de disposer de cristaux de grande taille. En effet, en faisant arriver un rayonnement monochromatique sur une multitude de grains où toutes les orientations se trouvent statistiquement réalisées, il y a toujours une famille de plans réticulaires (plans parallèles) qui satisfait à la condition de Bragg et qui peut conduire à des réflexions (1) décelables.

L'usage du diffractomètre s'est maintenant généralisé pour les opérations de détermination des minéraux argileux. Dans les cas simples, il suffit en effet d'une rotation du goniomètre d'une dizaine de degrés pour obtenir la première réflexion basale des principaux minéraux argileux. L'emploi d'une anticathode au cobalt déjà très utile lorsque l'échantillon est riche en fer permet de plus d'avoir un plus grand étalement aux petits angles entre 3° et 5°.

2. — *Application aux minéraux cristallisés simples accompagnant les argiles*

Un diffractogramme X est un véritable reflet de la structure, et si l'on applique la loi de Bragg à la méthode des poudres, on peut très facilement identifier la plupart des minéraux simples présents dans la fraction $< 2\ \mu$ ou dans les autres fractions granulométriques du sol, et ceci sans remonter aux paramètres a, b et c de la maille. Deux minéraux différents n'ont jamais strictement les mêmes distances interatomiques, et ils n'ont donc jamais le même diffractogramme ; à l'aide des 3 réflexions les plus intenses, un fichier ASTM (2) permet l'identification des différents composés cristallisés organiques ou minéraux existants.

Le tableau 1 donne ces 3 raies caractéristiques pour les minéraux les plus fréquents dans les sols. On peut voir que les différents oxydes, hydroxydes... se différencient aisément. Il en est de même pour des composés très proches comme la calcite ou l'aragonite ; parmi les feldspaths, il serait possible de distinguer les différentes espèces, en particulier dans la série des plagioclases albite-anorthite.

Dans un mélange de minéraux associés, on retrouvera en général toutes les raies des différents minéraux, juxtaposées, ce qui ne sera pas le cas, comme nous le verrons plus tard, lorsqu'il y a interstratification de minéraux. L'identification de plusieurs minéraux en mélange est donc possible en faisant le relevé de toutes les raies du diagramme.

3. — *Application aux minéraux argileux proprement dits* (phyllosilicates)

L'application de la loi de Bragg aux minéraux argileux peut paraître simple en ce qui concerne les plans cristallins parallèles à la surface des feuillets (fig. 1) : on détermine en effet aisément l'épaisseur du feuillet anhydre qui correspond à la réflexion basale du premier ordre d 001, et qui se produit pour les plus petites valeurs de l'angle de réflexion (θ entre 3 et 10°). La valeur obtenue permet de

(1) Nous utiliserons par la suite ce terme de réflexion consacré par l'usage, bien qu'il ne corresponde pas à la réalité physique de la diffraction.

(2) American Society for testing and material (1964).

TABLEAU I

Détermination des minéraux cristallisés accompagnant les argiles minéralogiques dans la fraction < 2 μ

	Minéraux	Composition	Raies de diffraction caractéristiques (en Å)		
Tectosilicates	Quartz	SiO_2	3,34	4,26	1,82
	Orthose	$K\,AlSi_3O_8$	3,22	3,32	3,79
	Plagioclases*		3,17	3,22	6,4-6,5 4,03-4,05 3,74-3,78
Carbonates	Calcite	$CaCO_3$	3,04	2,29	2,10
	Aragonite	$CaCO_3$	3,40	1,98	3,27
	Dolomite	$MgCa(CO_3)_2$	2,88	2,19	1,80
	Sidérite	$FeCO_3$	2,78	1,72	1,95-2,12
Sulfures	Pyrite	FeS_2	1,63	2,41	2,69
	Hauérite	MnS	3,07	1,18	1,84
Sulfates	Gypse	$CaSO_4, 2H_2O$	7,56	3,06	4,27
Phosphates	Apatite (Fluoro hydroxy ou chloro apatite)	$CaX_2\ 3Ca_3(PO_4)_2$ X = F(OH) ou Cl	2,81	2,78	2,71
Oxydes et hydroxydes	Rutile	TiO_2	3,26	1,69	2,49
	Anatase	TiO_2	3,51	1,89	2,38
	Ilménite	$FeOTiO_2$	2,75	2,45	1,83
	Boehmite	γ AlO OH	6,23	3,16	3,24
	Diapore	$\alpha\ AlO_2H$	3,98	2,31	1,63
	Gibbsite	$Al(OH)_3$	4,85	4,37	2,39
	Hématite	$\alpha\ Fe_2O_3$	2,69	2,59	1,69
	Lépidocrocite	γ FeO OH	6,25	3,29	2,46
	Goethite	$\alpha\ FeO_2\ H$	4,18	2,45	2,70
	Magnétite	Fe_3O_4	2,53	1,48	1,61
	Pyrolusite	$\beta\ MnO_2$	3,12	1,62	2,40
	Manganite	MnO_2H	3,40	2,64	2,28
	Pyrochroïte	$Mn(OH)_2$	4,73	2,45	1,83

* Des variations interviennent entre les variétés riches en Na et celles riches en Ca.

connaître directement le type de feuillet. On distingue ainsi les minéraux à 7 Å dits 1/1, composés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, de ceux à 10 Å (ou 2/1), composés de 2 couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, ou enfin des minéraux à 14 Å (2/1-1) ayant 1 couche brucitique supplémentaire, et que la classification actuelle (Madrid, 1972) ne différencie plus fondamentalement des précédents (cf. BRINDLEY et PÉDRO, 1973).

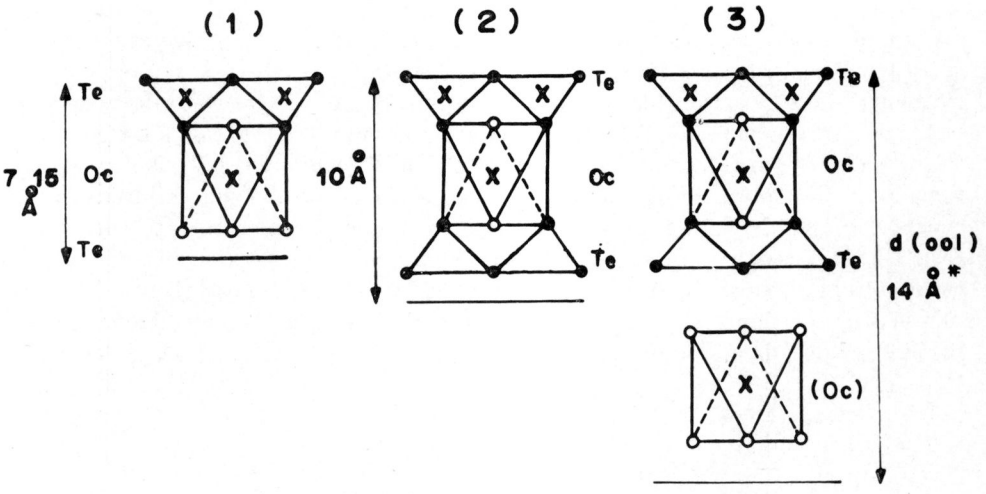


FIG. 1. — *Principaux types de structure des minéraux phylliteux. Représentation du feuillet élémentaire*

Te : couche tétraédrique
Oc : couche octaédrique

La réflexion sur les plans 001 est donc fondamentale et ce sera elle qui dans notre système simple permettra la détermination.

Mais d'autres réflexions doivent être également considérées. Tout d'abord, l'existence de réflexions sous multiples *d* 002, *d* 003 qui donnent des distances égales à $d\,\frac{001}{2}$ ou $d\,\frac{001}{3}$, vont traduire une certaine régularité dans la structure.

Si l'on considère ensuite les réflexions sur les autres plans limitant la maille (plans kho, par exemple), deux éléments importants sont à prendre en compte :

1° Dans certains cas, il peut exister non pas des pics nets, mais des bandes (hk) qui traduisent l'existence d'une structure turbostratique (bipériodique ou bidimensionnelle). La structure n'est plus régulière par suite de rotation ou de glissement de feuillets les uns par rapport aux autres. Cette question très complexe nécessiterait des développements théoriques plus approfondis (cf. MERING et OBERLIN, 1971 ; MERING, 1975 ; MAMY [1], 1975). Elle est très importante pour la minéralogie des sols dans la mesure où l'altération provoquera souvent un passage d'un état tridimensionnel à un état moins ordonné, par exemple, pour la transformation mica → smectite ou kaolinite → halloysite, alors que les agradations ou la diagenèse peuvent produire le passage inverse, montmorillonite → illite ou halloysite → kaolinite.

[1] Article en préparation.

2° La réflexion *d* 060 relative à un autre ensemble de plans, nous donne le paramètre *b* : *d* 060 = *b*/6 ; la valeur de ce paramètre reflète le remplissage ou l'occupation octaédrique ; ainsi, pour *d* 060 voisin de 1,49 Å, le minéral est dioctaédrique (occupation par Al ou Fe^{3+}) ; si elle est de 1,54, le minéral est trioctaédrique (occupation des octaèdres par Mg, Fe^{2+}...). Précisons toutefois que l'utilisation de cette réflexion n'est pas possible dans le cas où l'on a une structure turbostratique (cas de smectite). De plus, le quartz souvent présent en impureté présente un pic à 1,54 Å.

La détermination des minéraux argileux serait cependant relativement simple, si les feuillets dont on a déterminé à la fois l'épaisseur et l'occupation, étaient en permanence disposés immédiatement les uns sur les autres. Mais si cela peut être le cas de certains minéraux neutres (kaolinite, talc, pyrophyllite), ce n'est en général pas celui des minéraux 2/1, qui sont les plus abondants dans les sols des régions tempérées. Ces minéraux « chargés » possèdent en effet des espaces interfoliaires occupés, soit par des cations peu hydratés comme K, soit par des cations plus hydratés (Na, Ca, Mg), soit même par des cations hydroxylés (Al-Fe) ; l'épaisseur de ces espaces interfoliaires pourra donc être selon les cas très différente. Toute détermination suppose donc une bonne connaissance d'un certain nombre de propriétés caractéristiques de ces argiles 2/1.

II. — PROPRIÉTÉS DES MINÉRAUX ARGILEUX 2/1

1. — *Rappel sur la classification des minéraux 2/1*

La classification actuelle des minéraux 2/1 (tabl. 2) est basée sur leur composition cristallochimique (Brown, 1955 ; Brindley, 1962 ; Caillère et Hénin, 1963 ; Pédro, 1965). Le premier critère depuis Stockholm (A. I. P. E. A., 1963) est une résultante globale de cette composition qui s'exprime par la charge interfoliaire (1), puis interviennent le caractère di ou trioctaédrique, l'origine de la charge (substitution tétraédrique ou octaédrique), ou même la nature du cation saturant la charge (K dans les micas). Dans leur projet de classification, Mering et Pédro (1969) font même intervenir des caractéristiques plus fines qui sont l'ordre ou le désordre dans les substitutions isomorphes ou dans la répartition des cations compensateurs.

Nous verrons de plus que dans les sols, et par suite principalement de filiation de minéraux par transformation progressive du réseau, des catégories spéciales doivent être introduites ; par exemple, les smectites « de transformation », ou les minéraux dénommés « intergrades » en anglais (minéraux hydroxy-alumineux).

Lors de la détermination des argiles des sols, il sera en général difficile, à l'aide des seuls rayons X, de remonter à la composition cristallochimique qui s'exprime dans une formule structurale ; il faudrait connaître pour cela non seulement le type de structure, mais également la composition chimique du minéral et celle des impuretés qui l'accompagnent. On utilisera donc plus généralement des tests de comportement des minéraux : avec l'eau, avec des composés organiques, ou lors

(1) Cette charge interfoliaire que l'on peut mesurer dans les minéraux non micacés par la capacité d'échange en cation, apparaît directement au niveau des formules structurales.

TABLEAU 2

Classification des minéraux argileux 2/1

Canevas général A. I. P. E. A. 1966 (G. PÉDRO, 1967) avec des modifications

Type de structure	Valeur de la charge interfoliaire	Groupe	Sous-groupe		Espèces principales	
			dioctaédrique	trioctaédrique	dioctaédriques	trioctaédriques
2/1	nulle	pyrophyllite talc	pyrophyllite	talc	pyrophyllite	talc
	0,25-0,6	smectites	montmorillonite	saponite	montmorillonite (charge octaédrique) ; beidellite (charge tétraédrique) ; nontronite (Fe-Al)	saponite (charge tétraédrique) ; hectorite (charge octaédrique)
	0,6-0,9	vermiculites	vermiculites dioctaédrique	vermiculites trioctaédrique	vermiculite dioctaédrique	vermiculite *sensu stricto*
	0,5-0,9	phyllites micacées			illite (Al) - glauconite (Fe^{3+})	
	1	micas	dioctaédriques	trioctaédriques	muscovite phengite	phlogopite-biotite
2/1 + couche hydroxyde discontinue	0,25-0,6	minéraux hydroxy-alumineux ou hydroxy-ferriques	— gonflants (smectites Al ou Fe)			
	0,6-0,9		— non gonflants vermiculites Al ou Fe			
2/1 + couche hydroxyde complète	variable	chlorites	dioctaédriques	trioctaédriques	donbassite	pennine clinochlore prochlorite
		SS	di-trioctaédriques		chlorite di/trioctaédrique dioctaédrique dans feuillets micacés trioctaédrique dans couche hydroxyde →	Cockéite Sudoïte

du chauffage. Un certain nombre d'études générales reliant les propriétés des minéraux à leur composition et à la valeur de la charge (WALKER, 1958 ; BRINDLEY, 1966) nous permettent ensuite, avec un certain nombre de précautions, d'utiliser ces tests pour l'identification des minéraux argileux.

2. — *Propriétés d'hydratation et de gonflement* (intracristallin) *des minéraux argileux*

Cette propriété d'adsorber une ou plusieurs couches d'eau dans les espaces interfoliaires, avec variation concomittante des distances *d* 001, concerne uniquement les minéraux 2/1 (MERING, 1964). Elle est à distinguer de la simple fixation d'eau sur les surfaces externes, ou entre les particules, qui est alors une propriété générale des minéraux phylliteux (BARSHAD, 1954).

L'halloysite qui est un minéral 1/1 possède à l'état naturel une couche d'eau ; mais après un chauffage vers 100°C, cette eau disparaît, et le phénomène est irréversible : ce minéral ne peut plus se réhydrater.

Pour les minéraux 2/1, l'hydratation est à relier à l'existence d'une charge du feuillet. Il est bien entendu, cependant, que pour certains minéraux chargés, l'espace interfoliaire peut être « bloqué » vis-à-vis de l'hydratation, par l'existence d'ions peu hydratables (K dans certaines illites et dans les micas), ou par des cations hydroxylés formant des couches brucitiques plus ou moins organisées (chlorites ou minéraux hydroxyalumineux).

Les minéraux 2/1 qui s'hydratent facilement (vermiculites, smectites) sont dits expansibles, et plus leur charge sera faible, plus l'hydratation sera aisée. C'est bien ce que l'on constate dans le tableau 3, lorsque l'on compare les vermiculites (charge $> 0{,}6$) et les smectites (charge $\leqslant 0{,}6$).

Nous avons incorporé entre ces 2 familles de minéraux expansibles, seules reconnues par la classification actuelle, des minéraux très fréquents dans les sols (smectites de transformation) généralement issus des illites ou des micas, et qui possèdent des propriétés d'hydratation intermédiaires. Il est probable que leurs propriétés particulières sont à rattacher soit à la valeur de la charge (0,5-0,7) soit surtout à son origine (toujours à prépondérance tétraédrique comme pour les beidellites ou les saponites). Pour ces différents types de minéraux, l'hydratation sera très variable d'une part selon la nature du cation interfoliaire, et d'autre part, selon l'humidité relative du milieu.

En ce qui concerne le cation, d'une manière générale l'hydratation augmente lorsque la taille du cation diminue et lorsque sa charge augmente. Ainsi pour les cations monovalents, on trouve la série $Rb = Cs < NH_4 < K < Na < Li$ et pour les cations divalents, la série $Ba < Ca < Mg$. Les argiles H auront un comportement un peu analogue aux argiles Na ou Li ; par contre les argiles Al auront un comportement particulier plus proche des argiles saturées par les ions divalents (Mg-Ca).

Dans le tableau 3, les cations ont été classés dans un ordre correspondant à une taille décroissante, et ceci en considérant les monovalents puis les divalents. On constate bien que l'hydratation est plus aisée, pour tous les minéraux, lorsque l'on va du potassium au magnésium. Si on considère un même cation (colonne verticale), l'hydratation sera d'autant plus aisée lorsque l'on va vers le bas du tableau (minéraux de charge de plus en plus faible).

TABLEAU 3

Hydratation des minéraux 2/1 expansibles en fonction du cation interfoliaire et de l'humidité relative

1 couche d'eau $\simeq$ 2,9 Å ; épaisseur du feuillet anhydre $\simeq$ 9,4 Å

* Rb (r = 1,48 Å) et Cs (r = 1,69) auraient le même comportement que NH_4^+

Cation interfoliaire (rayon ionique Å)	NH_4* (1,48)	K (1,33)	Na (0,95)	Li (0,60)	Ba (1,35)	Ca (0,99)	Mg (0,65)
Vermiculite							
Eau vapeur < 60 % HR			← 1 couche →			← 2 couches →	
> 60 % HR	Fermeture 10,80 à 11,24	10,40	← 2 couches →				
Eau liquide (> 98 % HR)			2 couches	2 couches ou ∞	← 2 couches →		
						14,7 Å	14,9 Å
Smectite (de transformation) après chauffage à 110°C	← Fermeture →		← Fermeture →				
Eau vapeur < 60 % HR	Fermeture		← 1 couche →			← 2 couches →	
> 60 % HR	10,80	10,40	← 2 couches →				
Eau liquide	1 à 2 couches	1 à 2 couches	2 couches	∞	← 2 couches (15,5 Å) →		
Smectite, Beidellite ou *Saponite*							
Déficit de charge tétraédrique < 60 %		10 Å	1 couche	1 couche	2 couches	2 couches	2 couches
Déficit de charge tétraédrique > 60 %	1 couche (12,5 Å)		2 couches	2 couches	2 couches	2 couches	2 couches
Eau liquide	1 couche		2 couches	∞	← 2 ou 3 couches →		
Smectite type (déficit de charge octaédrique)							
Eau vapeur < 60 % HR	← 1 couche →		← 1 couche →			← 2 couches →	
> 60 % HR	← 1 couche →		← 2 couches (> 15 Å) →				
Eau liquide	← 1 à 2 couches →		∞	∞	3 couches	3 couches	4 couches

On peut prendre quelques exemples au sein de ce tableau et tout d'abord des cations de rayon > 1 Å, comme NH_4 et K. Il est bien connu que ces cations peu hydratables, dont le diamètre correspond en gros à celui de la cavité hexagonale formée par les oxygènes des feuillets superposés, peuvent s'y insérer en « fermant » les espaces interfoliaires et en provoquant la contraction du minéral vers 10 Å. C'est ce que l'on a pu appeler la « rétrogradation du potassium » ou de l'ammonium, ces cations devenant alors difficilement échangeables. Le tableau 3 précise les conditions de cette fixation par les différents minéraux 2/1. Ainsi, pour des vermiculites dont la charge est élevée, il y a fermeture des feuillets même en présence d'eau liquide.

Pour les smectites de transformation, la fermeture n'intervient que lors d'une dessiccation relativement intense (< 50 p. 100 d'humidité relative). Pour les smectites vraies, la fermeture à 10 Å n'intervient généralement pas et l'on trouve des distances interfoliaires ne descendant pas en dessous de 12 à 15 Å, et ceci même pour des humidités relatives très basses. MAMY et GAULTIER (1974) ont cependant montré qu'après de nombreux cycles d'hydratation et de dessication (80°C), des smectites vraies pouvaient acquérir la propriétés de se contracter à 10 Å avec K.

On peut noter une propriété particulière aux smectites de transformation (si elles sont de composition dioctaédrique) : elles peuvent dans certains cas se contracter à 10 Å après chauffage à 110°C avec des ions Li ou Na, et la réhydratation est alors difficile. Cette propriété peut expliquer la formation de la paragonite (Mica Na), ou également le « camouflage » de certains feuillets expansibles au sein des illites ou des glauconites.

Pour les cations divalents de rayon inférieur à 1 Å, les conditions d'hydratation ont une importance relativement moindre, dans la mesure où l'on aura toujours 2 couches d'eau aussi bien pour les vermiculites que les smectites, et ceci dans un domaine d'humidité très étendu (depuis quelques p. 100 jusqu'à 95 p. 100 d'humidité relative). Cela justifie le choix que nous avons fait du magnésium pour saturer les argiles. Par contre, l'usage du sodium à des humidités comprises entre 40 et 60 p. 100 (valeurs d'humidités fréquentes dans les laboratoires) serait gênante dans la mesure où il peut induire la formation de minéraux « interstratifiés » avec certains feuillets à 1 couche d'eau (12 Å) et d'autres à 2 couches d'eau (15 Å).

Lorsque l'humidité dépasse 95 p. 100, avec le sodium, le lithium et les ions H^+ (smectites), ou seulement avec le lithium (vermiculites), les minéraux argileux expansibles présentent le phénomène de gonflement dit « illimité » : il y a écartement des feuillets à des distances supérieures à 20 Å et formation d'un état voisin de celui d'un gel (NORRISH, 1954-1972). Aux mêmes humidités et à l'état Mg ou Ca, les espacements des smectites ne dépassent pas 18 à 20 Å ; ceux des vermiculites restent toujours voisins de 14 Å.

Le rôle de la saturation interfoliaire est même plus important que l'on a pu le voir ici, en considérant les seules variations de la distance des feuillets. Des études récentes de LA CALLE *et al.* (1975) montrent en effet que les cations ont une influence également sur l'ordre et la régularité de la structure. Ainsi, si des cations comme Na et Ca ne perturbent pas la superposition des feuillets, d'autres comme Mg provoquent déjà, dans le cas des vermiculites, l'apparition de bandes (hk) au lieu de réflexions nettes : il s'agit là d'une structure semi-ordonnée avec apparition d'une seule bande (hk) 020 à 4,60 Å.

3. — *Comportement avec les polyalcools*

S'il est indispensable de connaître les propriétés d'hydratation des différents minéraux argileux, leur utilisation pour une détermination pose un certain nombre de problèmes. En particulier, les distances obtenues à l'aide des rayons X varient dans une gamme trop étendue, et souvent de façon apparemment continue. Il est donc difficile d'établir des coupures nettes entre les différentes espèces.

C'est pourquoi il est en général préférable de remplacer l'eau interfoliaire par un liquide organique non ionisé, mais présentant une dissymétrie dans les charges (composé polaire). Un grand nombre de tels composés organiques serait utilisable [1] (BARSHAD, 1952 ; CALVET, 1963 ; GREENLAND, 1965 ; MORTLAND, 1970), mais ce sont en général les polyalcools (glycérol et éthylène glycol) qui sont le plus couramment employés (MCEWAN, 1944 ; BRINDLEY, 1966). Deux caractéristiques de ces composés seront importantes à considérer : la constante diélectrique et le moment dipolaire : elles vont jouer à la fois sur la facilité de formation du complexe avec l'argile, et sur l'écartement des feuillets qui en résulte.

	Eau	Éthylène glycol	Glycérol
Constante diélectrique	78	37	40
Moment dipolaire	1,85	2,28	2,80

D'une façon générale, l'expansion sera d'autant plus élevée que le moment dipolaire est plus grand, et effectivement on retrouve l'ordre d'expansion eau < éthylène glycol < glycérol. Par contre, la constante diélectrique a un effet plus difficile à cerner (BARSHAD, 1952), car elle joue : — tout d'abord sur la séparation des feuillets, et dans ce cas, l'expansion augmente lorsque la constante diélectrique augmente — mais elle joue aussi sur la facilité de formation du complexe et la force de celui-ci, et à ce moment-là, l'expansion augmente lorsque la constante diélectrique diminue. Ainsi, dans le cas qui nous intéresse, les complexes sont plus aisés à former avec l'éthylène glycol qu'avec le glycérol.

L'éthylène glycol et le glycérol vont former des couches monomoléculaires d'épaisseur constante à la surface des argiles. On peut utiliser cette propriété pour apprécier la surface externe et interne des argiles (DYAL et HENDRICKS, 1950 ; GUYOT, 1969) en pesant les quantités fixées (1 mg d'éthylène glycol fixé représente une surface de 3,22 m²) et l'on peut en tirer une estimation quantitative des minéraux 2/1 expansibles ; pour les problèmes d'identification à l'aide des rayons X, ce qui est important, c'est l'épaisseur apparente présentée et le fait que vermiculite et smectite fixent respectivement une couche ou 2 couches de polyalcools, en donnant des distances *d* 001 de 14 et 18 Å. L'identification est alors beaucoup plus nette qu'en utilisant les seules propriétés d'hydratation (tabl. 5).

[1] LAGALY et WEISS (1969) proposent une méthode de détermination de la charge des minéraux 2/1 à l'aide d'une réaction avec un sel d'alkyl-ammonium. Cette méthode intéressante est encore d'un usage difficile.

Cependant, là encore, le cation interfoliaire va jouer un rôle important :

— Ainsi, avec les cations de grand rayon K et NH_4, les vermiculites ne s'ouvrent généralement pas avec les polyalcools. Les distances ne dépassent pas 10,80 ou 10,40 Å. Le comportement des smectites sera très variable selon leur composition cristallochimique : si certaines smectites types (généralement à déficit de charge octaédrique) donnent toujours 2 couches, les beidellites (à déficit de charge tétraédrique) présentent en général une expansion beaucoup plus faible (≠ 1 couche) (HARWARD *et al.*, 1969) ; il en est de même pour certaines saponites (SUQUET *et al.*, 1975) également à charge tétraédrique et pour les montmorillonites de type cheto (GRIM et KULBICKI, 1961). Des smectites de transformation, intermédiaires entre vermiculites et smectites, peuvent soit se fermer comme les vermiculites avec ces cations et donc ne pas fixer les polyalcools, soit dans certains cas en fixer une seule couche.

— Avec les autres cations, les vermiculites sont généralement caractérisées par la formation d'un complexe à une seule couche de polyalcool. Cependant, les études de WALKER (1948) montrent qu'avec l'éthylène glycol, les vermiculites de basse charge commencent à former un complexe à 2 couches qui donne, sans qu'il y ait d'ailleurs interstratification, une distance de 16,30 Å inférieure à celle donnée par les montmorillonites (16,8 à 17,2).

Le complexe à 2 couches se forme préférentiellement dans l'ordre Li, Ba, Na < Sr < Ca < Mg (tabl. 4).

TABLEAU 4

Réaction des vermiculites de différentes charges avec les polyalcools à l'état liquide (WALKER, 1958)

Minéral		Na	Li	Ba	Ca	Mg
Vermiculite Young River	EG	16,3	16,1	16,2	16,2	*16,3*
Basse charge (0,6)	G	14,8	14,2	17,6	17,6	*14,3*
Vermiculite Macon	EG	14,8	16,0	16,2	16,1	*14,3*
N. Carolina (0,8)	G	14,8	14,3	14,3	14,3	*14,3*

Avec le glycérol et en prenant des précautions très particulières (glycérol liquide, temps de contact de plusieurs jours), certaines vermiculites forment un complexe à 2 couches, mais seulement avec Ca, Ba, et jamais avec Mg ou Na.

Le comportement des smectites de transformation (ROBERT et BARSHAD, 1971) démontre bien la continuité de la séquence au sein des minéraux expansibles : en effet, il y a formation d'un complexe à 2 couches avec l'éthylène glycol et tous les cations (K et NH_4 exceptés) ; avec le glycérol, le complexe à 2 couches se développe très facilement avec Ca et Mg, mais pas avec le sodium. Ce phénomène semble

encore se produire avec certaines beidellites (HOFMANN *et al.*, 1955 ; HARWARD et BRINDLEY, 1965), qui peuvent, même à l'état Mg, donner 14 Å avec le glycérol vapeur et 18 Å avec le glycérol liquide. Les véritables smectites types donneront par contre toujours 2 couches quelque soit le cation.

On voit donc que, là encore, des coupures nettes au niveau du comportement seront difficiles à obtenir (tabl. 5) :

— En fonction de la composition cristallochimique, on assiste à une expansion de plus en plus facile lorsque l'on va vers le bas du tableau, ce qui représente une charge de plus en plus faible ou localisée de plus en plus dans la couche octaédrique

vermiculite < smectite de transformation < smectite (beidellite saponite) < smectite type (montmorillonite)

— Une progression du gonflement est aussi décelable en fonction du cation saturant l'argile, du réactif employé et même de la forme du réactif, vapeur ou liquide (HARWARD *et al.*, 1969).

4. — *Comportement au chauffage*

Le chauffage est un excellent moyen de faire varier l'équidistance apparente des minéraux argileux 2/1, et il sera donc couramment employé pour leur détermination. Il est cependant important de connaître pour chaque température employée, les effets sur la structure du minéral ; pour cela, la connaissance des courbes obtenues lors des analyses thermiques (thermopondérales ou différentielles) se révèle spécialement utile (1). On peut distinguer lors de l'élévation de température, une série de phénomènes différents : déshydratation, déshydroxylation...

Tout d'abord entre 25°C et 200°C.

Il y a déshydratation ou perte de l'eau existant sous forme moléculaire. Selon le cation auquel elle se trouve liée, elle partira d'ailleurs plus ou moins vite, et on retrouve l'ordre Na-Li(K) < Ca < Mg.

La couche d'eau libre de l'halloysite part vers les mêmes températures (100°C).

Le départ de ces couches d'eau se traduit pour les minéraux 2/1 (ou 1/1 hydratés), par une diminution des distances *d* 001, et on obtient alors des distances plus proches du feuillet anhydre. Cependant, la réhydratation des minéraux 2/1 pouvant se produire pour des humidités relatives existant dans l'atmosphère ambiante, il faudra procéder à un examen immédiat ou même employer des cellules spéciales (cf. méthode).

La mise sous vide de l'échantillon à la température ordinaire produit un effet comparable à un chauffage à 110°C : un échantillon sous forme K, NH_4 ou Na, peut être presque complètement déshydraté (*d* 001 $\simeq$ 10 Å), alors que des échantillons saturés par Ca ou Mg garderont généralement une couche d'eau, ce qui se traduit par une distance *d* 001 proche de 12 Å. Il faut noter que l'enlèvement de l'eau des minéraux argileux fibreux (« structure en briques creuses ») ne se traduit pas par des variations sensibles du diffractogramme X.

(1) Sur certains diffractomètres, il est d'ailleurs possible de coupler le spectre de diffraction X et les courbes thermiques.

Entre 200 et 400°C se trouve une zone généralement assez caractéristique de la déshydroxylation des hydroxydes : goethite, gibbsite, boehmite. Si l'on chauffe à ces températures, les raies qui les caractérisent disparaîtront donc des spectres.

Dans la même zone, se produit également la déshydroxylation des minéraux intergrades entre vermiculites et chlorites (minéraux 2/1 à couche hydroxyde discontinue). Cette déshydroxylation se traduit par un retour progressif des distances *d* 001 de 14 Å vers 10 Å. Il ne s'agit plus là d'un processus de déshydratation et le phénomène n'est pas réversible. Plus la couche hydroxyde est organisée, plus la température de déshydroxylation se rapproche de celle d'une chlorite *sensu stricto*.

Entre 400°C et 700°C (ou plus), se produit alors la véritable déshydroxylation des minéraux 1/1 ou 2/1. Les températures de départ sont en relation étroite avec la structure (ordre 1/1 < 2/1) et avec la composition cristallochimique (ordre théorique $Fe^{2+} < Fe^{3+} < Al < Mg$). La déshydroxylation des chlorites s'effectue en 2 étapes (Caillère, Hénin, 1960) : couche hydroxyde d'abord, qui peut entraîner un renforcement de la raie à 14 Å, puis couche mica. Pour certains minéraux, la déshydroxylation s'accompagne d'une disparition des raies *d* 001 : c'est le cas de la kaolinite après 450°C ou de la chlorite *sensu stricto* après 700°C. Pour d'autres minéraux, les raies subsistent, par exemple, pour les illites et les montmorillonites.

Il est nécessaire de considérer spécialement le comportement au chauffage des smectites dioctaédriques saturées par un cation de petite taille comme Li (ou Mg) : il peut y avoir dans certains cas, aux alentours de 300°C, migration du cation des espaces interfoliaires vers les cavités octaédriques vacantes. C'est l'effet Hofmann Klemen (1950), bien étudié par Glaeser et Mering (1967), qui peut permettre de localiser l'origine de la charge des smectites (tétraédrique ou octaédrique). Cela peut servir à différencier par exemple les montmorillonites des beidellites : pour les montmorillonites, la migration de lithium permettra la quasi suppression de la charge de l'argile et la perte corrélative des propriétés d'hydratation ou de gonflement avec les polyalcools ; cela ne sera pas le cas des beidellites qui conserveront toutes ces propriétés (cf. test Hofmann Klemen).

5. — *Conséquences sur les traitements utilisés en détermination*

Un certain nombre de précautions qui ont été prises lors des divers stades de préparation des argiles apparaissent particulièrement justifiées. Citons par exemple, l'emploi prohibé de K ou NH_4 lors de l'extraction proprement dite, la saturation préconisée par le magnésium, ou enfin la nécessité de ne pas chauffer ou même dessécher les argiles avant leur détermiation.

Les tests de comportement sur lesquels est basé l'identification doivent être le plus nombreux possibles. Ainsi, pour les minéraux gonflants, l'*usage de l'éthylène glycol n'est souvent pas suffisant*, et le glycérol utilisé avec Mg ou Na apporte, comme le pensait déjà Walker (1949), une meilleure distinction entre vermiculite et smectite [1].

Le comportement des minéraux 2/1 avec le potassium apporte de nombreuses informations, et nous préconisons la généralisation de ce test (Comité de nomenclature, Madrid, 1974). Il permet d'abord la distinction immédiate entre vermiculite

[1] Pour les mêmes raisons, la fixation de glycérol nous apparaît préférable à celle de l'éthylène glycol pour l'estimation quantitative des vermiculites et smectites.

TABLEAU 5

Comportement des minéraux 2/1 expansibles avec les polyalcools

EG = éthylène glycol $HOCH_2 — CH_2OH$ — 1 couche = 4,3 Å — 2 couches = 7,6

G = glycerol $HOCH_2 — CHOH — CH_2OH$ — 1 couche = 4,9 — 2 couches = 8,2 Å

L = liquide — V = vapeur

Cation interfoliaire		NH_4	K	Na	Li	Ba	Ca	Mg
Vermiculite	EG	Fermeture 10,80	10,40	1 couche		1 couche selon la charge ou +		
				2 couches (16,30 Å)				
	G			1 couche		1 couche		
						2 couches ? (difficiles à obtenir)		
Smectite de transformation	EGV	Fermeture 10,80	10,40	2 couches				
	GV			1 couche			2 couches	
	EGL	1 couche		2 couches				
	GL			1 couche			2 couches	
	100°C	10,80	10,40	9,98	9,98 ou > 16 Å			
Smectite-Beidellite (déficit de charge tétraédrique)	GV	1 couche		1 couche		1 couche		
	EGV					2 couches		
	EGL GL	1 couche				2 couches		
	400°C				pas de fermeture			
Smectites type (déficit de charge octaédrique)	EGV GV EGL GL	1 à 2 couches selon la composition				2 couches		
	400°C				fermeture 9,6 Å			

TABLEAU 6

Détermination des minéraux argileux des sols à l'aide de la première réflexion sur les plans (001) *et de sa variation au cours de quelques traitements* (espèces simples)

EG : éthylène glycol

Minéraux	Structure	*d* 001 Å (saturation Mg)	Tests de comportement					
			Chauffage (échantillon maintenu déshydraté)			Gonflement (glycérol)	Saturation K	
			200°C	400°C	550°C		HR (%) sous vide	EG
Kaolinite	Te/OC	7,15 Å	7,15	—	destruction	—	—	—
Halloysite	Te/OC	7,5 - 10 Å	# 7,15	—	—	10	10	10
Micas - Illites	Te/OC/Te	# 10 Å	—	—	—	—	—	—
Vermiculite	—	14 Å	10	—	—	14	# 10	# 10
Smectite	—							
– Typique		> 14 Å	10	—	—	> 17	10	17
– Issue des Illites		⩾ 14 Å	10	—	—	⩾ 17	10	10 à 14
Intergrade à cation hydroxylé (Al-Fe) — non gonflant	Te/OC/Te + couche hydroxyde désorganisée	14 (002) faible	12-14	10-12	10-12	14	14	12-14
— gonflant	—	14 (002) faible			12-14	16,8 (+ aisé avec EG)	# 14	# 17
Chlorite	Te/OC/Te + couche hydroxyde organisée	14 (002) > (001)	14	14 (intensifiée)	14 puis destruction	14	14	14
Sépiolite	Minéraux fibreux	*d* 110 = 12	12	—	—	12	—	12
Palygorskite		10,5	10,5			10,5		10,5

normale et vermiculite hydroxyalumineuse (et chlorite) ; l'utilisation d'un échantillon saturé en K lors du chauffage permet de plus de diminuer les risques de réhydratation ; et enfin, lors de la réalisation du gonflement avec les polyalcools, une distinction est rendue possible au sein des smectites (SCHULTZ, 1969 ; ROBERT et BARSHAD, 1972).

III. — SCHÉMA SIMPLIFIÉ DE DÉTERMINATION DES MINÉRAUX ARGILEUX

A. — *Minéraux argileux de type simple* (espèces mononinérales)

Connaissant les principales propriétés des minéraux 2/1 qui se révèlent, à la fois les plus abondants dans les sols des régions tempérées, et les plus complexes dans leur comportement, il nous est possible de donner un tableau schématique pour la détermination des minéraux argileux à l'aide des rayons X (cf. tabl. 6) essentiellement basé sur la première réflexion *d* 001. Précisons cependant que les autres réflexions sont également importantes à considérer, et en particulier, les autres réflexions *d* 001 (cf. tabl. 10 en annexe).

La détermination est basée sur l'examen du diffractogramme X de l'échantillon saturé par le magnésium (1) et sur l'emploi de différents tests de comportement : mise sous vide ou chauffage, expansion avec le glycérol, saturation par le potassium (échantillon pouvant également servir au chauffage). Nous ne détaillerons pas trop ce tableau qui a été cité sous une forme plus appliquée dans un autre article, mais nous le complèterons plutôt par quelques remarques sur chaque famille de minéraux.

1. *Minéraux 1/1 à 7 Å* (Halloysite comprise)

Ils se *distinguent facilement* des minéraux 2/1 par la présence d'une raie aux alentours de 7 Å (7,30 Å pour les serpentines, 7,15 Å pour la kaolinite). Cette dernière distance n'est obtenue dans le cas de l'halloysite qu'après élimination vers 200°C de la couche d'eau libre. La distinction des variétés polymorphes (dickite, nacrite...) nécessite par contre des examens plus approfondis (cf. GRIM, 1968, p. 135 et suivantes).

Il existe en réalité une série continue allant de la kaolinite bien cristallisée à l'halloysite. Des kaolinites mal cristallisées pourront ainsi se caractériser par un élargissement et une assymétrie de raie (ex. 7,20 Å), et un affaiblissement des réflexions non multiples de 3. Ces modifications se font progressivement et l'on doit considérer les diverses réflexions jusqu'à 2,30 Å (BRINDLEY et ROBINSON, 1946 ; FLEURENCE et NICOLAS, 1964). Une difficulté particulière intervient lors du mélange kaolinite-chlorite. On doit alors chercher dans le diagramme les autres réflexions qui sont alors à des distances différentes :

Chlorite		Kaolinite	
d 003.....	*4,66 à 4,7*	*d* 002.....	*3,59*
d 004.....	3,53	*d* 003.....	2,38 Å

(1) Il est recommandé de ne jamais se baser exclusivement sur un échantillon dit « naturel » dont la saturation cationique n'est pas contrôlée.

Il faut signaler une méthode au diméthyl sulfoxyde (GONZALEZ GARCIA et SANCHEZ CAMAZANO, 1968) qui permet, sur une kaolinite, de faire passer *d* 001 de 7,15 à 11, 20 Å, ainsi que celle d' « intersalation » avec des sels d'ammonium ou de potassium (ANDREW et *al.*, 1960). Souvent, il sera également possible de détruire la kaolinite avant la chlorite soit par chauffage (550°C), soit par un traitement acide.

2. *Les micas ou phyllites micacées* (illites-glauconites).

Ils se distinguent eux aussi immédiatement par la présence d'une réflexion notée en général *d* 002 au voisinage de 10 Å (entre 9,5 et 10,3). Il sera nécessaire quand on peut le faire dans de bonnes conditions, de préciser par l'examen de la raie (060) la nature di ou trioctaédrique du minéral. Il est par exemple regrettable, pour des sols développés sur granite, d'employer le terme illite pour le simple fait que la taille des particules devient inférieur à 2 μ, dans des cas où manifestement il s'agit de minéraux micacés trioctaédriques.

Pour mieux caractériser ce minéral à 10 Å, on peut aussi calculer un indice de cristallinité (largeur du pic *d* 002 à mi-hauteur) (KUBLER, 1968 ; ESQUEVIN, 1969 ; DUNOYER, 1973) ; ou faire le rapport (004/002) qui sera beaucoup plus élevé pour un mica dioctaédrique (Al) que pour un mica trioctaédrique (Fe-Mg) et qui semble, pour des micas comparables, en relation avec la richesse en K_2O. On peut aussi distinguer les différents types de polymorphisme (1M, 2M1, 3T) en se basant sur un certain nombre de pics dans la zone 4,50 à 2,80 Å (BROWN, 1961).

3. *Minéraux expansibles* (vermiculites-smectites) (tabl. 5).

La différenciation entre vermiculite et smectite est relativement simple et elle se fera sur la base d'un test au glycérol (tabl. 6). Il est cependant important de distinguer en détail les minéraux ayant des propriétés intermédiaires et qui se placent dans la séquence :

$$\text{mica} \xrightarrow[\text{(diagenèse)}]{\text{(altération)}} \text{vermiculites} \longrightarrow \text{smectites}$$

Au sein des vermiculites, il est déjà possible en utilisant l'éthylène glycol, de mettre en évidence les vermiculites de basse charge, qui, saturées par certains cations, montrent une expansion au-delà de 16 Å (WALKER, 1954) (cf. tabl. 4).

Parmi les smectites (gonflement au glycérol), une division essentielle peut être introduite entre des smectites issues des micas et appelées de transformation, et les smectites types, généralement de néogenèse : le comportement de ces minéraux avec le potassium (fermeture irréversible au chauffage, ou expansion avec l'éthylène glycol ou le glycérol) apparaît comme un des meilleurs moyens de distinction, à condition toutefois que des hydroxydes de fer ou d'aluminium interfoliaires ne modifient pas le comportement.

Ces minéraux déjà étudiés dans le milieu naturel par WEAVER (1958), SCHWERTMANN (1962), ont pu être formés expérimentalement à partir des illites (ROBERT et BARSHARD, 1972 ; ROBERT, 1973). Différents noms ont pu leur être donnés : vermiculites gonflantes, ammersoïtes (RIVIÈRE *et al.*, 1961), vermiculites dioctaédriques (BARSHAD et KISK, 1970).

Ils ont été mis en évidence dans les horizons A_2 des podzols (GJEMS, 1963), où ils semblent se former préférentiellement à partir des minéraux micacés avec une transformation importante de la structure en milieu acide et complexant : DUCHAUFOUR (1972) les appelle alors montmorillonites de dégradation.

De tels minéraux gonflants se forment également à partir des micas dans les vertisols. Mais d'une manière plus générale, on les rencontre dans les sédiments et dans les sols où ils dérivent des illites (POCHON, 1975). Nous pensons comme SCHWERTMANN (1962) que ce type de smectite souvent mal distingué lors des déterminations, est prépondérant dans les sols des régions tempérées.

Du fait de leur charge souvent élevée et surtout de sa localisation en couche tétraédrique, ces minéraux proches des beidellites auront un comportement dans les sols très différent des véritables smectites (le plus souvent à charge octaédrique), aussi bien du point de vue physique que chimique ; il est probable que leur morphologie est également très différente (TESSIER, 1975). Il est donc très important de bien les distinguer.

Toujours à propos de l'étude des minéraux expansibles, nous signalerons l'intérêt du test Hofmann Klemen qui permet justement de reconnaître les smectites à charge tétraédrique des smectites à charge octaédrique (ce test n'est valable que pour les smectites dioctaédriques). De même, l'examen détaillé des réflexions (hkl) (SUQUET *et al.*, 1974) permet de distinguer les structures ordonnées strictement tridimensionnelles, des structures semi-ordonnées (apparition des bandes 02 l et 04 l), des structures turbostratiques où toutes les réflexions (hkl) donnent des bandes (hk). Là encore, il y a une relation avec la localisation des charges : dans les tétraèdres pour les structures ordonnées et semi-ordonnées, dans les octaèdres pour les structures turbostratiques.

4. *Minéraux 2/1 hydroxy-alumineux* [1].

Ce sont des minéraux que la classification actuelle place dans les minéraux 2/1 avec présence d'une couche hydroxyde supplémentaire désorganisée (ou discontinue). Si pour la majorité des minéraux intergrades, le cation hydroxylé interfoliaire est l'aluminium (JACKSON, 1963), on pourra néanmoins trouver le fer et très rarement le magnésium (RICH, 1968 ; CARSTEA *et al.*, 1970).

Les minéraux hydroxy « Alumineux » très fréquents sont parfois appelés chlorites secondaires pour bien indiquer leur origine pédogénétique par attaque de la couche octaédrique des minéraux 2/1 en conditions désaturées ou acides. Par opposition, la formation des chlorites vraies ou « primaires » est à rattacher à l'action du métamorphisme ou de la rétrodiagenèse. On trouve aussi dans la littérature le nom de vermiculite dioctaédrique qui est alors employé improprement.

La mise en évidence la plus simple de ces minéraux consiste à essayer de *les saturer par le potassium* et à *les déshydrater* par une *mise sous vide ou un chauffage* : une montmorillonite ou une vermiculite voient leur distance *d* 001 varier alors que celle des intergrades et des véritables chlorites ne change pas ; par un chauffage plus intense (pouvant aller jusqu'à 550°C), on observera une variation progressive de *d* 001, de 14 Å vers 10 Å, due à l'enlèvement des cales d'hydroxyde interfoliaire (fig. 2.)

[1] Le terme d'intergrade couramment utilisé dans la littérature en langue anglaise prêtant à confusion, il est préférable de parler de montmorillonite ou de vermiculite hydroxy-alumineuse ou hydroxy-ferrique.

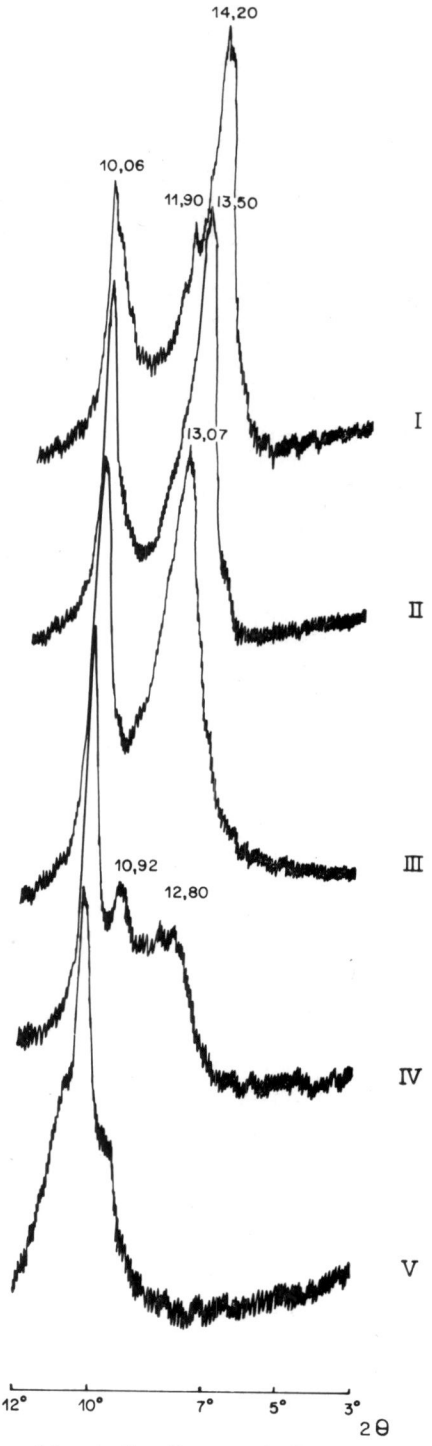


FIG. 2. — *Détermination d'une vermiculite hydroxyalumineuse à l'aide de différents tests de comportement*

(ROBERT et PÉDRO, 1972)

I : État nature après saturation par Mg
II : Après traitement par KCl N
III : — — — — à 110°C (ou sous vide)
IV : — — — — à 400°C
V : — — — — à 500°C.

Là encore, comme dans le cas des smectites de transformation, ce seront des minéraux 2/1 transformés progressivement, mais avec aluminisation des feuillets ; tous les intermédiaires peuvent donc exister avec des comportements au chauffage très variés. C'est ainsi que nous avons constaté que certains minéraux hydroxy alumineux formés expérimentalement lors du traitement par des acides organiques pouvaient être détruits dès 200°C (ROBERT et RAZZAGHE-KARIMI, 1974). La température la plus employée est 400 ou 450°C. Certains minéraux peuvent par contre être très stables jusqu'à 500°C, et mériteraient alors pour HÉTIER et TARDY (1969) le nom de chlorite secondaire *sensu stricto*.

Les traitements thermiques ne peuvent pas permettre de connaître le contenu des couches interfoliaires. Il est donc souvent utile de faire appel à des traitements chimiques.

Des études récentes non publiées (ROBERT et VENEAU) permettent de classer les divers réactifs possibles dans un ordre croissant en ce qui concerne l'extraction de l'aluminium :

$$KCl\ N < \text{Acétate } NH_4 \ll CO_3Na_2 < \text{oxalate } NH_4 \text{ (Tamm)}$$

$$< \text{Oxalate-disulfite} < \text{Citrate Na} \ll F\ NH_4 \text{ (Tamm-Deb)}$$

Si les deux premiers réactifs n'extraient que l'aluminium « échangeable », tous les autres extraient l'aluminium dit libre dont fait partie la majorité de l'aluminium hydroxylé fixé entre les feuillets des minéraux 2/1.

Le traitement par le citrate de Na apparaît cependant comme le plus simple à utiliser (cf. ROBERT et TESSIER, 1974 et fig. 3) : il permet à la fois l'extraction des éléments interfoliaires et leur détermination. Le minéral traité peut alors reprendre ses propriétés normales vis-à-vis de la déshydratation ou du gonflement, et l'on peut savoir si l'on se trouve en présence d'une vermiculite ou d'une montmorillonite. Le traitement beaucoup plus fort par NH_4F est parfois nécessaire pour nettoyer les feuillets, mais il a un effet destructeur non négligeable sur le feuillet lui-même.

D'une manière générale, si la couche hydroxyde reste discontinue, elle peut, tant que l'aluminium n'est pas très important, ne pas empêcher le gonflement avec le glycérol ou surtout l'éthylène glycol : on rejoint donc peut être ce que CAILLÈRE et HÈNIN (1949) ont pu appeler des pseudochlorites ou des chlorites gonflantes. Il semble d'ailleurs que le gonflement reste plus aisé si les intergrades sont ferrifères et si les smectites sont des smectites vraies.

Nous ferons ici une remarque importante à propos du gonflement des montmorillonites à des distances supérieures à 17,6 Å avec l'éthylène glycol ou à 18,2 Å au glycérol. Pour nous, ce phénomène intervient lorsqu'il y a, au sein de certaines zones interfoliaires, soit des couches hydroxydes (fer et aluminium), soit une couche de composés organiques. Dans certains cas où l'on peut supposer qu'il y a liaison préférentielle avec un des feuillets, le gonflement n'est pas empêché, et les 2 couches d'éthylène glycol ou de glycérol viendront s'appuyer sur ces cales. On peut obtenir alors des distances supplémentaires de 1 à 5 Å (18 à 23 Å) aussi bien dans le cas de montmorillonites hydroxy-alumineuses (MEYERS et AHLRICHS, 1972), que lorsque de la matière organique s'est introduite entre les feuillets (SCHOEN et HESS, 1964).

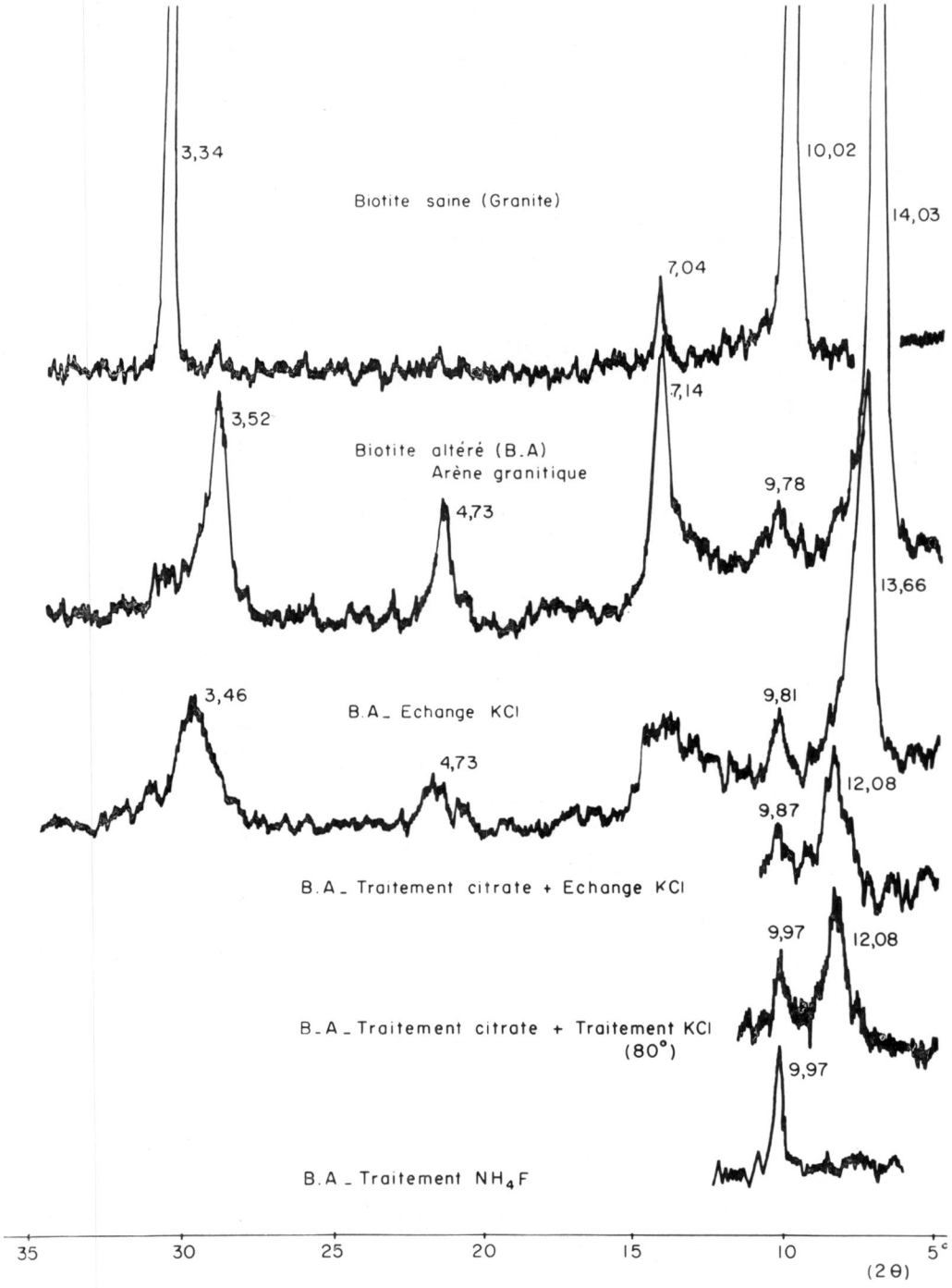


FIG. 3. — *Identification d'une vermiculite hydroxyalumineuse à l'aide de différents tests chimiques classiques*
(SEDDOH *et al.*, 1969)

5. *Dans les chlorites* vraies, généralement trioctaédriques, présentes dans les roches éruptives ou métamorphiques, la couche d'hydroxyde interfoliaire (appelée brucitique) est une couche complète et continue. Elle résiste normalement aux traitements chimiques sélectifs ou au chauffage à 550°C. Sa destruction à plus haute température s'accompagne de la disparition des raies 001. Une caractéristique du diagramme des véritables chlorites est de présenter une raie *d* 002 à 7,1, le plus souvent plus intense que la raie *d* 001 à 14 Å. Lorsqu'une chlorite primaire s'altère et acquiert un comportement un peu analogue à celui des intergrades, cette réflexion *d* 002 à 7 Å et la réflexion *d* 003 à 4,67 Å restent très intenses, ce qui permet la distinction avec les chlorites secondaires alumineuses de formation pédologique.

Notons que pour les chlorites, les études aux rayons X permettent d'aller plus loin dans la reconnaissance : déjà des chlorites ferrifères se distinguent par la présence de réflexion d'ordre impair 001 et 003 faibles, et des réflexions d'ordre pair de forte intensité à 7 Å et 3,53 Å ; des études détaillées des spectres (BRINDLEY et GILIERY, 1954) permettent même de distinguer les différentes espèces entre elles.

6. *Les minéraux fibreux.*

Ils seront en général reconnaissables sans grande difficulté par la présence dans les diffractogrammes de réflexions intenses à 10,5 Å (palygorskites) ou à 12 Å (sépiolite) et la comparaison des autres réflexions à un diagramme de référence, en particulier 6,44-4,3-3,25 et 2,55 pour la palygorskite et 4,5-4,3 et 3,75 pour la sépiolite. Les réflexions de premier ordre représentent des réflexions (110) et non plus (001) ; elles ne varient pas lors d'un chauffage modéré (300°C) ou lors d'un traitement par les polyalcools.

B. — *Minéraux argileux complexes ou interstratifiés*

A côté des minéraux simples, caractérisés par la superposition régulière d'un seul type de feuillet, il existe d'autres minéraux complexes qui comprennent plusieurs types de feuillets (2 ou parfois plus) dont la superposition peut être régulière ou irrégulière.

On a pu dire parfois que plus de 80 p. 100 des minéraux argileux des sols sont des minéraux interstratifiés. Sans aller jusque-là, il est évident qu'ils sont très abondants, spécialement dans les sédiments et les sols des régions tempérées, car ils représentent souvent des stades de transformation incomplète des autres minéraux simples. Pour prendre quelques exemples, les minéraux interstratifiés les plus fréquents que l'on peut trouver dans les sols sont ceux issus des *micas* ou des illites. Ils peuvent être composés en alternance d'un minéral anhydre (mica K) et d'un minéral hydraté (en général une vermiculite saturée par Mg) ; l'échange du potassium au cours de l'altération a pu se faire soit régulièrement 1 couche interfoliaire sur 2 (interstratifié régulier mica/vermiculite), soit d'une façon irrégulière. Si les micas se transforment en milieu acide, il y a intercalation d'une couche d'aluminium hydroxylée qui peut se faire elle aussi d'une manière plus ou moins régulière. On se trouve alors en présence d'un interstratifié mica/vermiculite hydroxyalumineuse, minéral très fréquent dans les sols, qui montre un pic continu entre 10 et 14 Å.

L'étude des minéraux interstratifiés pose de gros problèmes sur le plan théorique et l'on peut se référer à ce sujet aux nombreuses études fondamentales de HENDRICKS et TELLER (1942), MERING (1940), MCEWAN (1949), MCEWAN *et al.* (1961) et MCEWAN et RUIZ AMIL (1975). La méthode d'étude la plus classique consiste à utiliser des synthèses de Fourier, mais cela exige tout d'abord, une certaine analogie au niveau des facteurs de structure, ce qui implique une composition chimique proche ; cela suppose ensuite de pouvoir observer un certain nombre de réflexions sous multiples (5 à 6), ce qui n'est pas toujours le cas (GORBUNOV, 1968). Nous nous contenterons ici de faire quelques recommandations et de dégager une ligne de conduite simple permettant de déterminer les minéraux présents dans les sols.

Recommandations.

1° Pour bien distinguer les interstratifiés, il est important d'éliminer les « faux interstratifiés » dus à une saturation des feuillets par des cations différents (Na, Ca...) ou par un même cation présentant différents hydrates, et à ce sujet, l'utilisation du sodium est à éviter (présence possible de feuillets juxtaposés, à 1 couche ou à 2 couches d'eau).

2° Il est également important de bien distinguer les premières réflexions qui peuvent apparaître aux petits angles (0 à 5°) et qui sont les plus révélatrices de la présence des minéraux interstratifiés et de leur composition (WHITTIG, 1962) ; par exemple 24 Å (1) indique généralement une composante à 10 Å et une autre à 14 Å alors que 28 Å indique 2 composantes à 14 Å (tabl. 7).

TABLEAU 7

Détermination des minéraux interstratifiés basée sur la réflexion 001 entre 20 et 32 Å

Mg normal	Mg glycérolé	Chauffé 500°C	Minéral interstratifié
24	24	24	Mica chlorite
24	24	20	Mica vermiculite
24	28	20	Mica montmorillonite
28	28	24	Vermiculite chlorite
28	32	20	Vermiculite montmorillonite
28	32	24	Montmorillonite chlorite

3° Il sera important enfin de distinguer les différentes réflexions *d* 001. Une séquence régulière permettra de distinguer les minéraux interstratifiés réguliers ou l'on retrouvera les différents ordes ; exemple : 24-12-8-6..., des minéraux interstratifiés irréguliers où seules les toutes premières réflexions seront présentes. Cette distinction n'est cependant pas toujours évidente et tous les intermédiaires existent entre un ordre parfait et le désordre complet.

(1) Il est fréquent aussi pour les interstratifiés à base de mica de trouver directement un pic à 12 Å ou un pic large de 10 à 14 Å.

Règles générales de détermination.

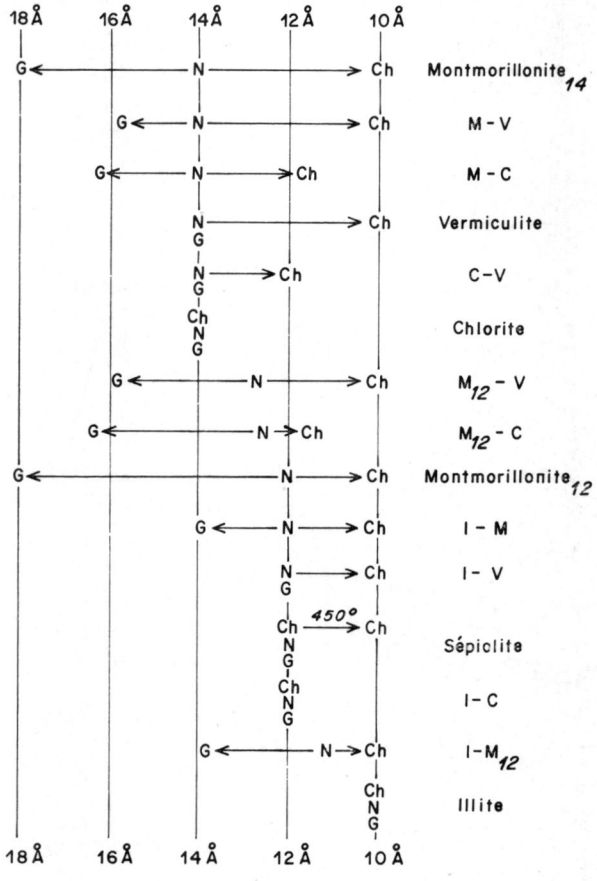
Il s'agit de déterminer d'une part les différents minéraux simples constituants, d'autre part leur proportion relative dans le minéral complexe (taux d'interstratification) et enfin le type d'interstratification auquel on a affaire (régulier ou irrégulier).

En se basant sur les tests cités précédemment, servant à la détermination des minéraux simples, il est relativement aisé de déterminer les constituants de l'interstratification (LUCAS *et al.*, 1959 ; VENIALE et van der MAREL, 1969) ; les minéraux interstratifiés peuvent en effet très bien être considérés comme des minéraux individuels avec une grande fréquence de répétition (GRADUSOV, 1971). Au cours de cette détermination on se basera sur la réflexion *d* 00 l entre 10 et 20 Å ou mieux, quand cela est possible, sur le déplacement, au cours des tests de comportement, de la réflexion multiple > 20 Å (tabl. 7 et 8).

TABLEAU 8

Détermination des minéraux interstratifiés basée sur les réflexions 001 entre 10 et 20 Å
(d'après LUCAS *et al.*, 1959)

G : traité au glycérol N : normal Ch : chauffé à 550°C



La détermination du taux d'interstratification est plus délicate. Chaque fois qu'une composante mica entre dans le mélange, il est possible de la déterminer par une analyse de K_2O total. Pour les autres cas, il faudra faire des études théoriques, ou se référer à des abaques tels qu'ils sont définis par exemple par McEwan *et al.* (1961).

Pour préciser le type d'interstratification (régulier ou irrégulier), on fait intervenir la probabilité qu'ont les divers feuillets de se succéder ; une représentation graphique (Sato, 1966) permet alors beaucoup mieux de caractériser le type d'interstratification. La notation de l'interstratifié se fait ensuite selon les recommandations de l'A.I.P.E.A, 1966 (cf. Pédro, 1967), en écrivant le constituant dominant en premier et en indiquant entre parenthèse le rapport approximatif (2-1...) ou mieux le pourcentage (75-25).

Minéraux interstratifiés réguliers.

La répétition des différents types de feuillets constituants se fait d'une manière régulière ; exemple AAB AAB... ou AB ABA. Leur étude est plus facile et on a pu

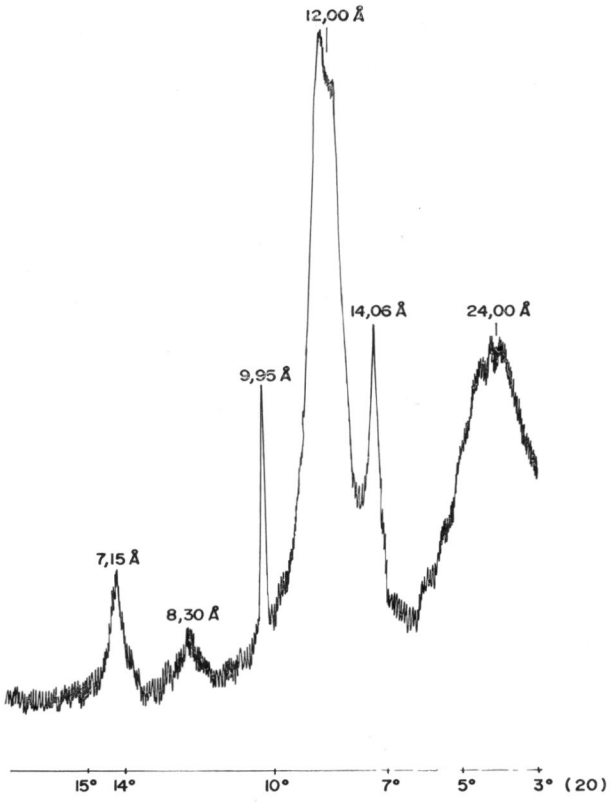


Fig. 4. — *Interstratifié Mica-Vermiculite*
(Soumis aux tests classiques de comportement, le minéral se referme vers 10 Å par chauffage et aucune expansion supplémentaire ne se produit avec les polyalcools)

souvent les caractériser par un nom : Allevardite ou rectorite pour un interstratifié mica montmorillonite, hydrobiotite pour un interstratifié mica vermiculite, ou corrensite si les composantes sont des chlorites et des chlorites gonflantes. Le terme d'hydrobiotite introduit par GRUNER en 1934 nous paraît à éviter dans la mesure où il a été, par la suite, employé pour désigner seulement des biotites vermiculitisées.

Ces minéraux interstratifiés réguliers présents dans les sédiments ou dans les formations hydrothermales, peuvent se former aussi au cours de l'altération superficielle. On rencontre d'ailleurs souvent des interstratifiés réguliers mica-montmorillonite, mica-vermiculite (fig 4) ou chlorite-vermiculite (JOHNSON, 1964) et chlorite-montmorillonite dans des minéraux de grande taille ($\simeq$ 1 mm).

Minéraux interstratifiés irréguliers.

Nous ne discuterons qu'un seul type de minéraux interstratifiés très abondant dans les sols et les sédiments : il s'agit d'interstratifiés illites-smectites formés soit au cours de la diagenèse, soit au cours de l'altération superficielle. Déjà, au sein de certaines illites types (illite Fithian par exemple), on sait qu'il existe souvent un certain p. 100 d'interstratification avec des minéraux gonflants (jusqu'à 20 ou 30 p. 100) ; leur présence se traduira uniquement par un élargissement dissymétrique de la raie *d* 001 vers les petits angles (10,3-10,5), surtout visible si l'on examine un échantillon traité par le glycérol ou l'éthylène glycol. Il y a donc un véritable camouflage d'un minéral par un autre. Ce comportement est bien illustré par la figure extraite de WEAVER (1956) (fig. 5). De nombreuses études se basant sur les rapports des intensités des différentes réflexions (001) permettent aussi de calculer le taux

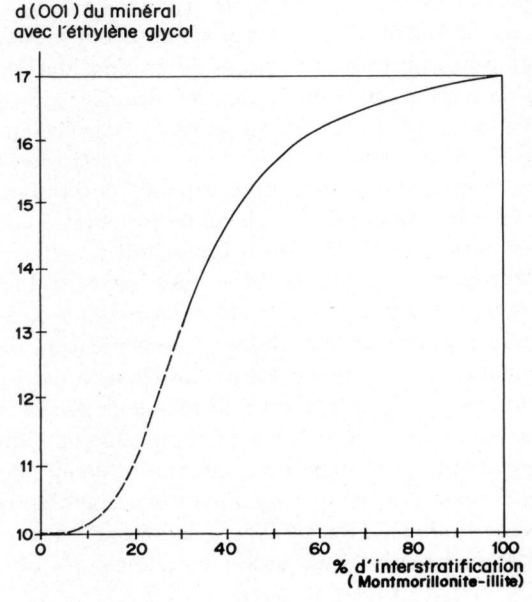


FIG. 5. — *Déplacement du pic* (001)
en fonction du taux d'interstratification montmorillonite/illite
(WEAVER, 1956)

d'interstratification (HOWER et MOWATT, 1966 ; REYNOLDS, 1967 ; REYNOLDS et HOWER, 1970). Signalons que quelquefois la présence d'un interstratifié mica montmorillonite peut se manifester seulement par la présence d'un pic à 9,5 Å sur le minéral glycérolé. Il s'agit alors là de la réflexion du 3e ordre, la réflexion du 1er ordre difficile à distinguer se trouvant à 28,5 Å.

CONCLUSION

La place importante tenue par les techniques de diffraction des rayons X pour l'étude des minéraux argileux apparaît justifiée dans la mesure où leur utilisation permet, avec un certain nombre de précautions, une détermination simple du type de feuillet (1/1-2/1), puis des grandes familles de minéraux (vermiculites, smectites, micas). Ceci est réalisable, comme nous venons de le montrer, en se basant principalement sur la première réflexion basale (001) et son déplacement au cours de divers tests de comportement.

Pour des études plus approfondies ou pour déterminer l'espèce argileuse (nontronite, montmorillonite...), il sera cependant nécessaire de compléter ces données par l'utilisation de nombreuses autres méthodes. Ainsi, des études thermiques et chimiques ou l'utilisation de la spectroscopie infrarouge permettent de caractériser beaucoup mieux la composition cristallochimique des minéraux, voire même, pour des cas simples d'établir des formules structurales. De plus, des études indirectes basées sur les propriétés de surface des minéraux (mesures de surface externe ou interne et de capacités d'échange) apportent un certain nombre de données de vérification ou souvent des données plus quantitatives.

Nous avons limité l'utilisation des rayons X à une détermination qualitative des minéraux ; les problèmes posés par une détermination quantitative restent en effet très grands dans la mesure où l'intensité des pics de diffraction ne dépend pas uniquement de la quantité de minéral présent, mais également (JACKSON, 1956) de la présence d'éléments amorphes, de la taille des particules, du degré de cristallinité, de la composition cristallochimique et surtout de l'orientation des particules. En contrôlant un certain nombre de ces éléments (orientation et taille des particules, extraction des éléments amorphes), il sera cependant possible d'indiquer la proportion relative des minéraux présents. L'obtention d'un véritable bilan minéralogique exige encore, répétons-le, la combinaison de nombreuses autres méthodes.

Comme nous avons pu déjà le souligner, l'identification des minéraux argileux si elle est suffisamment poussée, apporte des indications importantes sur l'origine des sols et les différents processus ayant pu marquer leur genèse. De plus, au cours de l'identification, on fait appel à des tests de comportement qui sont basés directement sur des propriétés importantes des minéraux argileux : hydratation et gonflement, aptitude à former des complexes avec des composés organiques ou à fixer des cations de grande taille (K). Sur ces bases, la détermination constituera donc une bonne approche des propriétés physiques et chimiques des minéraux argileux dans les sols.

Reçu pour publication en juillet 1975.

SUMMARY

PRINCIPLES OF QUALITATIVE DETERMINATION OF CLAY MINERALS BY X-RAYS SPECIAL PROBLEMS PRESENTED BY THE MOST COMMON CLAY MINERALS IN THE SOILS OF TEMPERATE REGIONS

This article presents a simple method of determining clays based on observation of the first basal reflection and on its variation during various « behaviour tests ». It consists of three parts :

The first defines the main problems presented by the application of Bragg's law in determining the minerals present in the clay-fraction of the soils. The second part considers in greater detail the case of 2/1 clay minerals which are most frequently found in the soils of temperate regions : the chief properties of these minerals that may be used for their characteristics are reviewed. The last part presents a simple chart and some critical observations on the determination of the principal families of clay minerals.

ZUSAMMENFASSUNG

PRINZIPIEN DER QUALITATIVEN BESTIMMUNG VON TONIGEN MINERALIEN MIT HILFE VON RÖNTGENSTRAHLEN SPEZIELLE PROBLEME DER HÄUFIGSTEN TONIGEN MINERALIEN IN DEN BÖDEN DER GEMÄSSIGTEN ZONEN

Die vorliegende Arbeit zeigt eine einfache Bestimmungsmethode für Tone auf, die auf der Beobachtung der ersten basalen Reflexion und ihrer Veränderung im Lauf von verschiedenen « Verhaltenstests » beruhen. Sie umfasst drei Teile :

Der erste Teil legt die hauptsächlichsten Probleme dar, die durch die Anwendung des Gesetzes von Bragg für die Bestimmung der vorhandenen Mineralien in der tonigen Fraktion des Bodens gestellt werden.

Der zweite Teil befasst sich im speziellen mit den tonigen Mineralien 2/1, welche sich in den Böden der gemässigten Zonen als die Häufigsten erweisen : die wichtigsten Eigentümlichkeiten dieser Mineralien, die für ihre Charakterisierung gebraucht werden können, werden dargestellt. Der letzte Teil schliesslich enthält ein einfaches Schema und einige Bemerkungen über die Bestimmung der wichtigsten Familien der tonigen Minerale.

РЕЗЮМЕ

Принципы качественного определения глинистых минералов с помощью лучей X. — Особые проблемы связанные с наиболее часто встречающимися в почвах районов умеренного климата, глинистыми минералами.

М. РОБЕР.

В работе представлен простой метод определения глин, основанный на наблюдениях над первым базальным отражением, и над его измене-

ниями в течении разных « тестов поведения ». Работа состоит из трех частей :

В первой — рассматриваются главные проблемы связанные с применением закона Брагга при определениях материалов глинистой фракции почв. Во второй, разбираются особые случаи глинистых имнералов 2/1 встречающихся чаще всего в почвах районов умеренного климата : их главные свойства могут охарактеризовать эти минералы. И, в последней части работы фигурируют упрощенная схема главных подразделений глинистых минералов и заметки для их определения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andrew R. W., Jackson M. L., Wadak K., 1960. Intersalation as a technique for differentiation of kaolinite from chlorite minerals by X ray diffration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 422-424.

A. S. T. M., 1964. American Society for testing and materials. Index to the powder diffraction file (inorganic). Special technical publication 48 N 2, 786 p.

Barshad I., 1952. Factors affecting the interlayer expansion of vermiculite and montmorillonite with organic substances. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 176-182.

Barshad I., 1954. Adsorptive and swelling properties of clay water system. *Clay and clay technology. Calif. dept. Nat. ressources div. Mines*, **169**, 70-77.

Barshad I., 1960. X ray analysis of soil colloïds by a modified salted paste method. *Clays and clay Min.*, **7**, 350-364.

Barshad I., Kishk F. M., 1970. Factors affecting potassium fixation and cation exchange capacities of soil vermiculite clay. *Clays and clay Min.*, **18**, 127-137.

Brindley G. W., Robinson K., 1942. Randomness in the structures of kaolinitic clay minerals. *Trans. Faraday Soc.*, **42**, B, 198-205.

Brindley G. W., Gillery F. H., 1956. X ray identification of chlorite species. *Am. Min.*, **41** (3-4), 169-186.

Brindley G. W., 1966. Ethylene glycol and glycerol complexes of smectites and vermiculites. *Clay Min.*, **6**, 237-259.

Brindley G. W., Pédro G., 1973. Rapport du Comité International de Nomenclature (AIPEA Madrid 1972). *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **25**, 37-41.

Brown G., 1961. X-ray identification and crystal structures of clay minerals. *Miner. Soc. Great Britain, Monograph*, London, 345 p.

Caillère S., Hénin S., 1949. Experimental formation of chlorites. *Miner. Mag.*, **28**, 612-620.

Caillère S., Hénin S., 1960. Relation entre la constitution cristallochimique des phyllites et leur température de déshydratation. Application au cas des chlorites. *Bull. Soc. Fr. Céramique*, **48**, 63-67.

Caillère S., Hénin S., 1963. *Minéralogie des argiles*. Masson, Paris, 343 p.

De La Calle C., Suquet H., Pezerat H., 1975. Glissement de feuillets accompagnant certains échanges cationiques dans les monocristaux de vermiculites. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **27**, 31-49.

Calvet R., 1963. Mise au point bibliographique : les complexes organiques des argiles. *Ann. agron.*, **14**, 31-117.

Carstea D. D., Harward M. E., Knox G., 1970. Comparison of Iron and Aluminium hydroxy interlayers in Montmorillonite and Vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 517-521 et 522-526.

Duchaufour Ph., 1972. *Processus de formation des sols*. Collect. études et recherches Académie de Nancy Metz, 182 p.

Dunoyer de Segonzac G., 1969. Les minéraux argileux dans la diagenèse. Passage au métamorphisme. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. et Lor.*, **29**, 320 p.

Dyal R. S., Hendricks S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69**, 421-432.

Esquevin J., 1969. Influence de la composition chimique des illites sur la cristallinité. *Bull. Centre Rech. Pau, SNPA*, **3**, 147-154.

Fleurence A., Nicolas J., 1964. Observations sur la notion d'ordre et de désordre de certains minéraux du groupe de la kaolinite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, 149-162.

Gay R., 1961. *Cours de cristallographie*. Livre III-1re partie. Radiocristallographie théorique. Gauthier Villars, Paris, 278 p.

GJEMS O., 1962. A swelling dioctahedral clay mineral of a vermiculite-smectite type in the weathering horizons of podzols. *Clay Min. Bull.*, **5**, 183-193.

GLAESER R., MERING J., 1967. Effet du chauffage sur les montmorillonites saturées de cations de petit rayon. *C. R. Acad. Sc.*, **265**, 833-835.

GONZALES GARCIA S., SANCHEZ CAMAZANO, 1968. Differenciation of kaolinite from chlorite by treatment with dimethylsulphoxide. *Clay Min.*, **7**, 447-450.

GORBUNOV N. I., 1968. Individual and interstratified minerals in soils and their identification by the X-ray. *Sov. Soil Sci.*, 1288-1300.

GRADUSOV B. P., 1971. X-ray study of minerals with a mixed layer structure. *Sov. Soil Sci.*, 62-75.

GREENLAND D J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. *Soils and fertilizers*, **28**, 415-425 ; 521-532.

GRIM R. E., KULBICKI G., 1961. Montmorillonite : High temperature reactions and classification. *Am. Min.*, **46**, 1329-1369.

GRIM R. E., 1968. *Clay mineralogy*. Mac Graw Hill, New York 3.

GRUNER J. W., 1934. The structure of vermiculite and their collapse by dehydratation. *Am. Min.*, 557-575.

GUINIER A., 1964. *Théorie et technique de la radiocristallographie*. Dunod, Paris, 740 p.

GUYOT J., 1969. Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption. *Ann. agron.*, **20**, 333-359.

HARWARD M. E., BRINDLEY G. W., 1965. Swelling properties of synthetic smectites in relation to lattice substitutions. *Clays and clay Min.*, **13**, 209-222.

HARWARD M. E., CARSTEA D. D., SAYEGH A. E., 1969. Properties of vermiculites and smectites : expansion and collapse. *Clays and clay Min.*, **16**, 437-447.

HENDRICKS S. B., TELLER E., 1942. X-ray interference in partially ordered layer lattices. *J. chem. phys.*, **10**, 147-167.

HESS C., SCHOEN U., 1964. Tirsification et classification des vertisols. Apport de l'analyse minéralogique des argiles à la connaissance des tirs. *Al Awamia*, **13**, 41-92.

HÉTIER J. M., TARDY Y., 1969. Présence de vermiculite-Al, montmorillonite-Al et chlorite-Al et leur répartition dans quelques sols des Vosges. *C. R. Acad. Sc.*, **263**, D, 259-261.

HOFMANN U., KLEMEN R., 1950. Verlust der Austausch fähigkeit von Lithiumionen und Bentonit durch Erhitzung. *Z. anorg. Allg. Chem.*, **262**, 95-99.

HOFMANN U., WEISS A., KOCH G., MELHER A., SCHOLZ A., 1955. Intercrystalline swelling cation exchange and anion exchange of minerals of the montmorillonite group and of kaolinite. *Clays and clay Min.*, **4**, 273-287.

HOWER J., MOWATT T. C., 1966. The mineralogy of illites and mixed layer illite/montmorillonite. *Am. Min.*, **51**, 825-854.

JACKSON M. L., 1956. *Soil chemical analysis*. Advanced course. Publ. University of Wisconsin, Madison.

JACKSON M. L., 1963. Aluminium bonding in soils. An unifying principle in Soil Science. *Soil Sci. Am. Proc.*, **27**, 1-10.

JOHNSON L. J., 1964. Occurrence of regularly interstratified chlorite vermiculite as a weathering product of chlorite in a soil. *Am. Min.*, **49**, 556-572.

KUBLER B., 1968. Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinite de l'illite. *Bull. Centre Rech. Pau SNPA*, **2**, 385-394.

LAGALY G., WEISS A., 1969. Determination of the layer charge in Micatype layer silicates. *Proc. Int. clay conf. Tokyo I*, 61-80.

LUCAS J., CAMEZ Th., MILLOT G., 1959. Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. Cart. Géol. Als. Lor.*, **12**, 21-31.

MAC EWAN, D. M. C., 1944. Identification of montmorillonite group minerals. *Nature*, **154**, 577-578.

MAC EWAN, D. M. C., 1949. Some notes on the recording and interpretation of X-ray diagrams of soil clays. *J. Soil Sci.*, **1**, 90-103.

MAC EWAN, D. M. C., RUIZ AMIL A., BROWN G., 1961. Interstratified clay minerals in *The X-Ray identification and cristal structures of clay minerals*, 393-445, Brown ed., *Mineralogical Soc. London*.

MAC EWAN, D. M. C., RUIZ AMIL A., 1975. Interstratified clay minerals, in *Soil Components*, **2**, GIESEKING ed., Springer Verlag, Berlin, 634 p.

MAMY J., GAUTHIER, 1974. Réarrangement structural de la montmorillonite associé à la diminution d'échangeabilité du potassium. *C. R. Acad. Sc.*, **278**, série D, 3153-3155.

MERING J., 1949. X-ray diffraction in disordered layer structures. *Acta cryst.*, **2**, 371-377.

MERING J., 1963. Gonflement, dispersion et hydratation des argiles. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **14**, 115-123.

MERING J., PÉDRO G., 1969. Discussion à propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **21**, 1-30.

MERING J., OBERLIN A., 1971. The smectites in electron optical investigation of clays. *Min. Soc. London*, 383 p.

MERING J., 1975. Smectites. In *Soil Components*, **2**, GIESEKINK ed., Springer Verlag, Berlin., 634 p.

MEYERS N. L., AHLRICHS J. L., 1972. Correlation of X-ray, IR, DTA, DTGA and CEC observations on Al-hydroxy interlayers. *Proc. Int. clay conf. Madrid*, **549**-559.

MILLOT G., 1964. *Géologie des argiles*. Masson, Paris, 499 p.

MORTLAND M. M., 1970. Clay organic complexe and interactions. *Adv. Agron.*, **22**, 75-117.

NORRISH K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Disc. Faraday Soc.*, **18**, 120-134.

NORRISH K., 1972. Forces between clay particles. *Proc. Int. clay conf. Madrid*, 375-383.

PÉDRO G., 1965. La classification des minéraux argileux. *Ann. agron.*, **16**, numéro hors série 1, 108 p.

PÉDRO G., 1967. Commentaires sur la classification et la nomenclature des minéraux argileux (AIPEA Jérusalem 1966). *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **19**, 69-86.

POCHON M., 1975. Évolution de la phase aluminosilicatée des sols sous climat tempéré humide du Haut-Jura Suisse (Domaine calcaire). *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **27**, p. 69-85.

REYNOLDS R. C., 1967. Interstratified clay system : calculation of the total one dimensional diffraction faction. *Am. Min.*, **52**, 661-672.

REYNOLDS R. C., et HOWER J., 1970. The nature of interlayering in mixed layer illite/montmorillonite. *Clays and clay Min.*, **18**, 35-36.

RICH C. I., 1968. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. *Clays and clay Min.*, **16**, 15-30.

ROBERT M., BARSHAD I., 1972. Sur les propriétés et la détermination des minéraux argileux 2/1 expansibles (vermiculites-smectites). *C. R. Acad. Sci.*, **275**, D, 1463-1465.

ROBERT M., PÉDRO G., 1972. Établissement d'un schéma de l'évolution expérimentale des micas trioctaédriques en fonction des conditions du milieu. *Proc. Int. clay conf. Madrid*, 433-447.

ROBERT M., 1973. Sur une séquence d'évolution expérimentale des glauconites. *C. R. Acad. Sc.*, **277**, D, 989-991.

ROBERT M., RAZZAGHE-KARIMI, 1974. Évolution des micas trioctaédriques en présence d'acides organiques. *Bull. Groupe fr. Argiles*, **26**, 307-317.

ROBERT M., TESSIER D., 1974. Méthode de préparation des argiles des sols pour les études minéralogiques. *Ann. agron.*, **25** (6), 859-882.

SATO M., 1965. Structure of interstratified (mixed layer) minerals. *Nature*, **208**, 70-71.

SCHULTZ L. G., 1969. Lithium and potassium absorption. *Clays and clay Min.*, **17**, 115-149.

SCHWERTMANN U., 1962. Eigenschaften und Bildung aufweitbarer. Dreitschicht Tonminerale in böden aus sedimenten. *Beit-zur. Min und Petr.*, **8**, 199-209.

SEDDOH F. K., PÉDRO G., ROBERT M., DEJOU J., 1969. Sur l'évolution des biotites et la formation d'intergrades à 14 Å (vermiculite-chlorite) dans les arènes granitiques de Tazilly (Massif de Luzy), Morvan Méridional). *C. R. Acad. Sc.*, **268**, D, 1901-1904.

STEPHEN I., MAC EWAN D. M. C. (1951). Some chlorite clay minerals of unusual type. *Clay Min. Bull.*, 157-162.

SUQUET H., De la CALLE C., PEZERAT H., 1975. Swelling and structural organisation of saponite. *Clays and clay minerals*, 23, 1-9.

TESSIER D., 1975. *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles*. Thèse C. N. A. M., Paris.

VENIALE F., VAN DER MAREL H. W , 1969. Identification of some 1/1 regular interstratified trioctahedral clay minerals. *Proc. of the Int. clay conf. Tokyo*, I, 233, 244.

WALKER G. F., 1958. Reactions of expanding lattice clay minerals with glycerol and ethylene glycol. *Clay Min. Bull.*, **3**, 302-313.

WEAVER C. E., 1956. The distribution of mixed-layer clays in sedimentary rocks. *Am. Min.*, **41**, 202-221.

WEAVER C. E., 1958. The effect and geologic significance of potassium fixation by expandable clay minerals derived from muscovite, biotite, chlorite, and volcanic material. *Am. Min.*, **43**, 839-861.

WHITTIG L.D., 1965. X-Ray diffraction techniques for minéral identification and minéralogical composition ; in *Methods of Soil Analysis* part 1, *Amer. Soc. of Agron.* nº 9, Madison, Wisc., BLACK ed., 770 p.

ANNEXE I

Le tableau suivant (tabl. 9) donné dans un but de commodité regroupe les principales réflexions trouvées dans les diagrammes X effectués en minéralogie des sols. Ces réflexions ont été classées depuis les petits angles (grandes distances réticulaires) jusqu'aux grands angles. Comme nous le signalons, ce tableau est en grande partie tiré de JACKSON et BROWN (1954).

TABLEAU 9

Principales réflexions rencontrées dans les diffractogrammes X en minéralogie des sols (classées en partant des petits angles)

(d'après M. L. JACKSON et B. F. BROWN, 1954)
G. : glycérol, EG : glycérol)

Distance en Å	Ordre	Minéral	Type de minéraux
32 Å (G), 28 Å	1er	Interstratifié régulier chlorite-montmorillonite, vermiculite-montmorillonite	
28 Å (G), 24 Å	1er	Interstratifié mica-montmorillonite	minéraux
28 Å	1er	Interstratifié chlorite-vermiculite	interstratifiés
24 Å	1er	Interstratifié mica-vermiculite ou mica-chlorite	
18-24 (G)	1er	Montmorillonite avec matière organique interfoliaire	faux
18 après H_2O_2 prolongé			interstratifiés
18-24 (G)	1er	Montmorillonite avec hydroxyde interfoliaire	
18 après citrate	2e	Interstratification irrégulière Mica-montmorillonite	
19,2-19,5			
17,7-18,1 (G)	001	Montmorillonite	
17,2		Interstratification irrégulière mica-montmorillonite	
17 (EG)	001	Montmorillonite	1° ordre des
16-16,80 (EG)		Interstratification irrégulière mica-montmorillonite	principaux minéraux
16,30 (EG)	001	Vermiculite de basse charge	2/1 expansibles
15-15,5	001	Montmorillonite	ou 2/1 + couche
14,2	001	Chlorite ou vermiculite	hydroxyde
10-14		Interstratification 10/14	
12 Å		Minéraux 2/1 saturés par cations monovalents ou interstratification, sépiolite	
11		Halloysite (eau ou G)	
10,2		Palygorskite	
10,0	001	Illite-micas	minéral 2/1 anhydre
9,5		Interstratification irrégulière mica 60/montmorillonite 40	
9,2		Talc	
9,2		Interstratification irrégulière mica 40/montmorillonite 60	

TABLEAU 9 (*suite* 1)

Distance en Å	Ordre	Minéral	Type de minéraux
9,1		Pyrophyllite	
8,85 (G)	002	Montmorillonite	
8,6		Interstratification irrégulière 7/10 Å	
8,40-8,48		Amphiboles	minéraux fibreux
7,30		Antigorite chrysotile	
7,10-7,35		Halloysite partiellement déshydratée	minéraux 1/1
7,14	001	Kaolinite, métahalloysite	
7-7,20	002	Chlorite (ou vermiculite)	
6,30-6,45		Feldspaths, palygorskite	
6,23		Boehmite	minéraux 2/1
5	002	Muscovite	
4,7-4,9	003	Chlorite	
4,83		Gibbsite	
4,6-4,7		Talc	
4,6	003	Vermiculite	
4,57		Pyrophyllite	
4,45-4,60	110	Montmorillonite, vermiculite, muscovite, illite	
4,45-4,46	110	Kaolinite	minéraux 1/1
4,42	110	Métahalloysite	
4,34		Gibbsite	oxydes ou hydroxydes
4,29		Gypse	
4,21		Quartz	
4,15		Goethite	
4,05		Cristoballite	
3,66	003	Halloysite (G ou eau)	minéraux 1/1
3,59-3,64	002	Antigorite chrysotile	
3,57-3,58	002	Métahalloysite, kaolinite	
3,54 (G)	005	Montmorillonite	
3,52-3,58	004	Chlorite	
3,50-3,55	004	Vermiculite	
3,47		Anatase	
3,35		Quartz	
3,33	003	Muscovite, illite	
3,21-3,28		Feldspaths potassiques, palygorskite	
3,12-3,23		Feldspaths plagioclases	
3,11-3,25		Hornblende	silicates primaires ou carbonates
3,15		Gypse	oxydes et hydroxydes
3,03		Calcite	
2,88		Dolomite	
2,87		Gypse	
2,77-2,83		Apatite	
2,73		Hornblende	
2,69-2,73		Apatite	
2,69		Hématite	
2,54		Ilmenite	
2,53		Magnétite	
2,52		Olivine	
2,51		Hématite	
2,46		Olivine	
2,43		Goethite	
2,34		Boehmite	
2,28		Calcite	
2,19		Dolomite	
1,92		Gypse-Calcite	

TABLEAU 9 (*suite* 2)

Distance en Å	Ordre	Minéral	Type de minéraux
1,88		Anatase	
1,87		Calcite	
1,85		Boehmite	
1,81		Quartz	
1,80		Dolomite	
1,72		Ilménite	
1,69		Anatase	
1,69		Hématite	
1,61		Magnétite	
1,53-1,55	060	Biotite, chlorite (trioctaédrique)	060 des argiles
1,53	060	Glauconite (Fe^{3+})	
1,50	060	Muscovite (dioctaédrique Al^{3+})	
1,49	060	Kaolinite	
1,48		Magnétite	
1,44		Hornblende	

ANNEXE 2 (tabl. 10)

(*pages ci-après*)

TABL

Diagrammes de poudre des principaux minéraux phyl

d_{hkl} = distance interréticulaire : pour la montmoril
I = intensité : les réflexions les
Les indices sont ceux de Miller. Pour les
(pour une structure $2M_1$) ou
Pour certaines illites (1M) les indices d_{001}

Muscovite (Gilead)		Illite (Gilead)		Biotite (1M)			Kaolinite		
Å)	I								
		9,98 à 10,2	8	001	10,1	10			
		,97	4				001	7,16	10
		7	6	020 ; 110	4,58	4	020	4,47	4
							110	4,36	5
							111	4,18	5
							111	4,13	3
			2				021	3,84	4
							002	3,57	10
				022 ; 003	3,36	8	111	3,37	4
				112	3,15	3	112	3,14	3
				?	2,91	3	112	3,10	3
							022	2,75	3
					2,65	6			
							130 ; 201 ; 130	2,56	6
						4	131 ; 112	2,53	4
						6	131 ; 200 ; 112	2,49	6
							003	2,38	6
							202 ; 131 ; 113	2,34	9
							131 ; 131	2,29	8
							?0*	2,19	3
								2,13	3
								1,99	6
								1,94	4
								1,84	4
									4
									7
									6
								,9	8

affectés d'un signe

ÉAU 10 (1)

iteux (BROWN 1961, avec des simplifications)
onite les distances d_{001} sont celles du minéral glycérolé
olus faibles ont été supprimées
minéraux 2/1 la 1re réflexion 001 est notée 002
001 (pour une structure 1M)
seraient à diviser par deux ; 10 Å = 001

Chlorite (Penninite)			Vermiculite (Westchester)			Montmorillonite (Wyoming)		
						001	(17,7)	10
001	14,3	6	002	14,4	10			
						002	(8,85)	4
002	7,18	10	004	7,20	2			
003	4,79	10	006	4,79	2	003	(5,90)	3
020	4,61	2	02 l ; 11 l	4,60	8	02 ; 11	4,61	
						004	(4,33)	2
004	3,59	10	008	3,59	5	005	(3,54)	3
005	2,87	6	0,0,10	2,87	5	006	(2,95)	4
			130 ; 200 ; 20**2**	2,66	4			
131 ; 20**2**	2,59	3	132 ; 20**4**	2,60	5	13 ; 20	2,56	
13**2** ; 201	2,55	4	13**4** ; 202	2,55	4			
132 ; 20**3**	2,45	4						
13**3** ; 202	2,39	3	0,0,12 ; 13**6** ; 204	2,39	6			
133 ; 20**4**	2,27	2						
			13**8** ; 206	2,21	2	22 ; 04	2,22	
						008	(2,21)	1
007	2,05	2	138 ; 2,0,**10**	2,08	3			
13**5** ; 204	2,02	4	0,0,14	2,05	2			
			208	2,01	2			
135 ; 20**6**	1,90	1						
13**6** ; 205	1,84	3	1, 3, **12** ; 2, 0, 10	1,83	2			
			2,0,**14**	1,75	3			
			1,3,**14** ; 2,0,12	1,68	4	31 ; 15 ; 24	1,69	
137 ; 20**8**	1,58	4						
060 ; 33**1**	1,54	2	060 ; 1, 3, **16** ; 2, 0, 14 330 ; 33**2** ; 33**4**	1,54	6			
						33 ; 06	1,49	

égatif ont été représentés en caractères gras.

Ann. agron., 1975, **26** (4), 401-461.

ÉTUDE DE L'HYDRATATION DES ARGILES : INTERACTIONS EAU-MINÉRAL ET MÉCANISME DE LA RÉTENTION DE L'EAU (1)

I. — Étude d'une zéolite (natrolite) et de deux minéraux fibreux (attapulgite et sépiolite)

R. PROST

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

On définit d'abord, sur la base de critères d'absorption infrarouge, les états dans lesquels se trouvent les molécules d'eau au cours de la déshydratation de l'attapulgite et de la sépiolite. Puis, on étudie à l'aide de la technique de deutération partielle la structure des molécules d'eau correspondant à chacun de ces états.

On détecte sur tous les échantillons séchés à l'air la présence de molécules d'eau ayant la symétrie C_s. Dans le cas de la natrolite la symétrie C_s des molécules est due à la formation de liaison hydrogène entre l'un des hydroxyles de l'eau et un atome d'oxygène appartenant aux tétraèdres où Si^{++++} est substitué par Al^{+++}. Alors que dans le cas de l'attapulgite et de la sépiolite qui ne possèdent pas de substitution de Si^{++++} par Al^{+++} la symétrie C_s des molécules est due à la formation de liaison hydrogène entre molécules d'eau par l'intermédiaire d'un seul hydroxyle.

La déshydratation entraîne l'apparition d'états différents pour l'eau montrant la nécessité d'étudier le film d'eau adsorbé pour chacun des états défini précédemment par des méthodes ne perturbant pas l'arrangement des molécules d'eau : par exemple la spectroscopie infrarouge.

INTRODUCTION

La connaissane des relations eau-argile, essentielle pour une meilleure compréhension des propriétés physico-chimiques des argiles, implique, entre autre chose, la connaissance des mécanismes de l'hydratation des minéraux argileux.

La comparaison des isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau obtenus avec la montmorillonite, l'hectorite et la beidellite saturée par du sodium (Glaeser *et al.*,

(1) Thèse de Doctorat ès-Sciences physiques, soutenue à la Faculté des Sciences de Paris, le 14 mai 1975. La 2e partie de ce travail paraîtra dans le nº 5, 1975 des *Annales agronomiques*.

1967) montre, qu'il existe de grandes différences suivant la nature de l'argile. L'isotherme de la beidellite-Na, dont le déficit de charge positive est localisé dans la couche tétraédrique, présente des « marches ». Par contre l'isotherme varie de façon continue dans le cas des minéraux qui ont leur déficit de charge positive localisé dans la couche octaédrique (montmorillonite, hectorite). Cette différence disparaît lorsque les trois échantillons sont saturés par du calcium.

Ces résultats traduisent incontestablement un effet du réseau et des cations compensateurs sur l'hydratation des argiles.

Par ailleurs, l'étude comparative des isothermes d'adsorption de la montmorillonite et de l'hectorite sodiques et les courbes représentant les espacements apparents d_{001} des feuillets en fonction des humidités relatives, révèle des domaines dans lesquels les échantillons continuent à fixer de l'eau alors que les espacements ne varient pratiquement pas. Ce qui permet de conclure à la complexité du mécanisme de l'hydratation des argiles.

On explique généralement ces résultats en supposant qu'il y a d'abord ouverture des feuillets de l'argile par suite de l'hydratation des cations compensateurs, puis ensuite, remplissage des espaces interlamellaires sans qu'il y ait de modification dans l'espacement des feuillets.

Cette hypothèse pose clairement le problème de la répartition de l'eau sur la surface de l'argile au cours de l'hydratation du minéral.

Cette analyse rapide montre que l'étude des mécanismes de l'hydratation des argiles implique la connaissance :

— des interactions des molécules d'eau entre elles, avec les cations compensateurs et avec le réseau de l'argile,
— de la répartition de l'eau sur la surface du minéral.

Les méthodes spectroscopiques sont, sans aucun doute, les mieux adaptées à ce type d'étude. En effet, l'évolution des spectres d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur l'argile, en fonction de la teneur en eau, montre pour certains échantillons un changement important dans le profil des bandes d'absorption de l'eau, mais aussi des modifications au niveau des bandes de vibration de valence des hydroxyles de constitution des argiles et des groupements Si—O du réseau.

L'intérêt porté à l'étude des mécanismes de l'hydratation des argiles nous a paru justifier une étude allant dans le sens d'une meilleure connaissance des interactions entre l'eau, les cations compensateurs et le réseau de l'argile. L'étude des états de l'eau doit permettre de mieux cerner le problème de la répartition de l'eau sur la surface.

Les résultats présentés ont été obtenus, d'une part, à l'aide de méthodes classiques (analyse thermopondérale, analyse thermique différentielle, diffraction des RX)et, d'autre part, par spectroscopie infrarouge. Dans le cadre de cette dernière méthode, nous avons souvent mis à profit, l'aptitude des protons des molécules d'eau à être remplacés par des atomes de deutérium pour faire des deutérations complètes ou partielles.

Les systèmes eau-argile étudiés dans cette première partie correspondent à des états de l'eau généralement bien définis dont la complexité croît quand on passe de la natrolite à la sépiolite. Leur connaissance est nécessaire pour entreprendre l'étude du mécanisme de l'hydratation des smectites.

CHAPITRE I

APPLICATION DE LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE A L'ÉTUDE DE L'EAU PRÉSENTE DANS LES ARGILES

Nous commencerons ce chapitre par quelques rappels sur les vibrations fondamentales de la molécule d'eau vapeur et la notion de couplage intramoléculaire. Puis nous aborderons le problème des molécules d'eau associées en insistant plus particulièrement sur les notions de couplage intra et intermoléculaire, très importantes dans ce cas. Ensuite nous décrirons la méthode de deutération partielle qui a servi pour atténuer l'effet des couplages intra et intermoléculaires. La technique utilisée à cette occasion ayant déjà fait l'objet de publications (PROST, 1969, 1971, 1973, 1974), nous n'en ferons qu'une description sommaire. Le matériel employé est décrit dans l'annexe.

A. — DONNÉES SUCCINCTES SUR L'ABSORPTION INFRAROUGE DE L'EAU

La spectroscopie d'absorption infrarouge de l'eau vapeur, liquide ou de cristallisation, a fait l'objet d'un grand nombre de publications. L'ouvrage de EISENBERG et KAUZMANN (1969) et la monographie de FRANKS (1973) rassemblent l'essentiel des données physico-chimiques relatives aux différents états de l'eau et, en particulier, celles obtenues à l'aide de la spectroscopie infrarouge.

1. — *Vibrations moléculaires de la molécule d'eau vapeur : couplage intramoléculaire*

Les molécules H_2O et D_2O appartiennent au groupe ponctuel C_{2v} et possèdent trois modes normaux de vibration (fig. 1) :

ν_1 et ν_2 de type A_1
ν_3 de type B_1

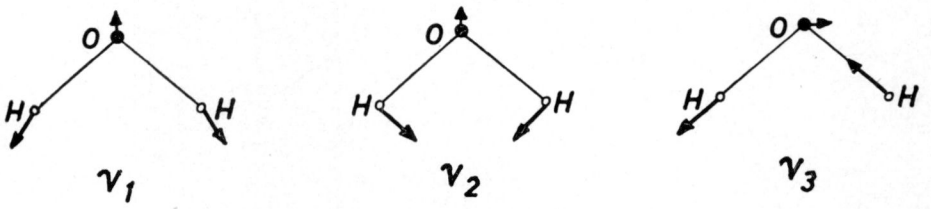


FIG. 1. — *Modes normaux de vibration de la molécule d'eau vapeur*

ν_1 : vibration de valence symétrique
ν_2 : vibration de déformation angulaire
ν_3 : vibration de valence antisymétrique

Il existe entre le produit des carrés des fréquences $\nu_1^2 \cdot \nu_2^2$ de H_2O et $\nu'^2_1 \cdot \nu'^2_2$ de D_2O appartenant au type A_1, une relation qui est la loi d'isotopie, ou règle de TELLER et REDLICH (HERZBERG, 1945).

Pour le type B_1, une relation similaire existe entre ν_3^2 et ν'^2_3.

La molécule HOD appartient au contraire au groupe ponctuel C_s. Ces trois molécules sont définies par la même fonction potentielle V (fonction potentielle de molécules isotopiques), la fonction cinétique T diffère d'une molécule à l'autre.

Le calcul des fréquences propres de ces trois molécules peut être obtenu par la méthode de WILSON (1955) faisant intervenir les fonctions V et T. En accord avec l'expérience, on obtient les fréquences indiquées dans le tableau I.

TABLEAU I

Fréquences de vibration des bandes d'absorption de la molécule d'eau vapeur (BENEDICT *et al.*, 1956)

Molécule	H_2O	HOD	D_2O
ν_1 (cm^{-1})	3 656,65	2 726,73	2 671,46
ν_2 (cm^{-1})	1 594,59	1 402,20	1 178,33
ν_3 (cm^{-1})	3 755,79	3 707,47	2 788,05

Une autre façon de s'exprimer, consiste à considérer que les vibrations de valence ν_1 et ν_3 sont la conséquence d'un couplage intramoléculaire. D'après FIFER et SCHIFFER (1970), KLING et SCHIFFER (1971), la substitution d'un proton de H_2O par un atome de deutérium, rend le couplage intramoléculaire négligeable. Il en résulte pour la molécule de HOD que l'énergie de vibration à la fréquence ν_3 est plus particulièrement localisée dans le vibrateur OH, tandis que l'énergie de vibration à la fréquence ν_1 est plus particulièrement localisée dans le vibrateur OD.

Bien que cela ne soit pas rigoureux, nous adopterons, dans la suite, la terminologie utilisée par la plupart des auteurs, dont SCHIFFER *et al.* Nous dirons, comme eux, que la substitution d'un proton de H_2O par un atome de deutérium entraîne la suppression des couplages intramoléculaires, et nous désignerons les groupes OH et OD de la molécule de HOD par groupes OH ou OD découplés.

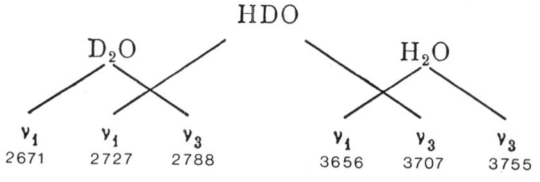


FIG. 2. — *Position relative des bandes de H_2O, HOD et D_2O*

On remarque, expérimentalement, que la fréquence de 3 707 cm^{-1} des groupes OH découplés par échange isotopique de H avec D, est voisine de la moyenne des

fréquences de vibration de valence de H_2O (fig. 2). De même, la fréquence de 2 727 cm^{-1} des groupes OD découplés est voisine de la moyenne des fréquences de vibration de valence de D_2O (fig. 2). Ces résultats, qui corroborent l'analyse de SCHIFFER *et al.*, montrent que la fréquence des groupes OH ou OD découplés peut en première approximation être considérée comme la fréquence propre de l'oscillateur OH ou OD. Les fréquences des modes normaux de la molécules H_2O ou D_2O, situées de part et d'autre de la fréquence propre de l'oscillateur, étant la conséquence du couplage des deux oscillateurs OH ou OD.

Cette analyse, qui n'est pas rigoureuse, permet cependant de rendre compte de façon extrêmement simple du déplacement relatif des fréquences des bandes d'absorption de la molécule d'eau au cours de la deutération. Nous développerons plus loin les conséquences pratiques de cette démarche.

2. — *Conséquences spectroscopiques de l'association des molécules d'eau : couplage intermoléculaire*

Les molécules d'eau peuvent s'associer entre elles ou avec d'autres molécules en formant des liaisons hydrogène. Ceci entraîne, en plus d'une forte augmentation de l'intensité d'absorption, un abaissement des fréquences de vibration de valence ν_1 et ν_3 et une augmentation de fréquence de la bande de vibration de déformation angulaire ν_2 (SAUMAGNE et JOSIEN, 1958 ; SAUMAGNE, 1970 ; BELLAMY *et al.*, 1971). Le déplacement en fréquence de la bande de vibration de valence antisymétrique est plus important que celui correspondant à la vibration de valence symétrique. Il apparaît par conséquent une diminution de l'écart entre les fréquences ν_1 et ν_3, au fur et à mesure que l'interaction moléculaire croît (GREINACHER *et al.*, 1955). Enfin l'association de molécules d'eau entre elles ou autour d'un cation engendre la formation de couplages intramoléculaires qui modifient le nombre et la position des bandes d'absorption (FALK et FORD, 1966 ; FIFER et SCHIFFER, 1970, 1971).

3. — *Utilisation de la technique de deutération partielle pour rendre négligeable l'effet des couplages inter et intramoléculaires*

La deutération partielle consiste à remplacer, dans des proportions convenables, un certain nombre de protons d'un ensemble de molécules d'eau associées par des atomes de deutérium (FALK et KNOP, 1973). Deux taux de substitution de H par D sont particulièrement intéressants à considérer (KLING et SCHIFFER, 1971).

a) Le taux de substitution de H par D pour lequel il y a une probabilité très faible d'avoir deux molécules H_2O voisines dans l'ensemble des molécules d'eau associées considéré. Cette situation entraîne pratiquement la suppression des couplages entre la molécule de H_2O et les molécules de D_2O qui l'entourent. On dit que cette molécule de H_2O, isolée au milieu de molécules de D_2O ou de HOD, est découplée (KLING et SCHIFFER, 1971).

Le spectre d'absorption infrarouge de chaque molécule de H_2O découplée est simplifié par suite de l'élimination des bandes dues aux couplages intermoléculaires. Il n'apparaît plus que les trois bandes dues aux modes normaux de vibration de la molécule de H_2O.

Dans l'ensemble des molécules d'eau associées considéré, le nombre des bandes

d'absorption observables sur le spectre des molécules d'eau découplées n'est plus alors fonction que du nombre des types différents de molécules d'eau qui peuvent être individualisés.

La distinction des types différents de molécules d'eau dans l'ensemble considéré est fonction le plus souvent de l'intensité des liaisons hydrogène qui associent les molécules d'eau les unes aux autres.

Deux cas peuvent se présenter :

1. Les deux hydroxyles de la molécule d'eau découplée contractent des liaisons hydrogène de même intensité. Ce type de molécules d'eau à la symétrie C_{2v}.

2. Les deux hydroxyles de la molécule d'eau découplée contractent des liaisons hydrogène de force différente. Ce type de molécules d'eau à la symétrie C_s.

Il peut naturellement exister à l'intérieur de chacun de ces deux grands groupes, des sous-groupes qui se différencient par l'intensité des liaisons hydrogène contractées. En effet une molécule d'eau qui a ses deux hydroxyles engagés dans des liaisons hydrogène faibles ou dans des liaisons hydrogène fortes conserve la symétrie C_{2v}, mais donne des bandes d'absorption à des fréquences différentes. Il en est de même pour les molécules d'eau de symétrie C_s.

En conséquence, le nombre de bandes d'absorption observées sur le spectre infrarouge des molécules d'eau découplées, donne des indications sur le nombre de types différents de molécules d'eau présentes dans l'ensemble des molécules d'eau associées considéré.

b) Le taux de substitution de H par D, envisagé maintenant, est celui pour lequel il y a une probabilité très faible d'obtenir deux groupes OH voisins dans l'ensemble des molécules d'eau associées considéré. Cette situation entraîne pratiquement la suppression des couplages intra et intermoléculaires pour les molécules contenant un groupe OH. On dit que ce groupe OH, isolé au milieu de groupes OD, est découplé. On observe alors dans le domaine des vibrations de valence OH, un spectre d'absorption infrarouge simplifié, par suite du déplacement de fréquence d'un des modes de vibration de la molécule HOD dans le domaine des vibrations de valence OD.

Bien que cela reste approximatif, on peut également considérer que les fréquences des bandes de vibration de valence des groupes OH découplés, correspondent aux fréquences propres des oscillateurs OH. Ceci revient à considérer les groupes OH découplés comme des groupements fonctionnels.

En conséquence, le nombre de bandes d'absorption observées dans le domaine des vibrations de valence OH, n'est plus alors fonction que du nombre des types différents de groupes OH individualisés dans l'ensemble des molécules d'eau associées considéré. Cette distinction est fonction de l'intensité des liaisons hydrogène dans lesquelles les hydroxyles de l'eau sont engagés. On identifie les groupes OH inclus dans des liaisons hydrogène et ceux qui ne le sont pas ; les premiers ayant une fréquence d'absorption inférieure à celle des seconds.

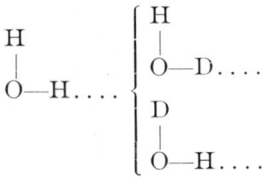
Les mêmes conclusions peuvent être tirées de l'examen des bandes dues aux groupes OD découplés ou aux molécules de D_2O découplées.

La combinaison des résultats obtenus pour ces deux stades de deutération partielle, permet le dénombrement des types différents de molécules d'eau présents dans le système, mais aussi l'identification de leur type de symétrie. En particulier, il est possible de déterminer si les deux groupes OH qui forment une molécule d'eau

sont identiques (symétrie C_{2v}) ou différents, par suite de la formation de liaisons hydrogène de forces inégales (symétrie C_s).

En effet, lorsqu'une molécule d'eau découplée a la symétrie C_{2v}, il est indifférent qu'un atome de deutérium se substitue à l'un ou l'autre des deux protons. On observe par conséquent, une seule bande d'absorption pour la vibration de valence OH de HOD.

Par contre, il n'en est pas de même lorsque la molécule d'eau découplée a la symétrie C_s par suite de la formation de liaisons hydrogène de forces inégales. Il apparaît dans ce cas deux ensembles de molécules HOD découplées :



1) les unes correspondant à la substitution effectuée sur l'hydroxyle engagé dans une liaison hydrogène forte,
2) les autres correspondant à la substitution effectuée sur l'hydroxyle engagé dans une liaison hydrogène faible.

L'existence de ces deux types de molécules HOD découplées entraîne le doublement du nombre des bandes d'absorption observables sur le spectre. Cette technique a été utilisée avec succès par un grand nombre d'auteurs, pour l'étude de l'eau de cristallisation des sels (FALK et KNOP, 1973). Le tableau 2 extrait d'un travail de SEIDL *et al.* (1969) indique le nombre de bandes d'absorption observables sur le spectre lorsqu'il y a n types de molécules d'eau découplées, dont m ont la symétrie C_s, et le reste la symétrie C_{2v}.

Le décompte des bandes observables est fait lorsque la molécule d'eau découplée est H_2O, D_2O ou HOD. Chacun de ces états correspond à un niveau déterminé dans la deutération de l'ensemble des molécules d'eau associées considéré.

Pratiquement, nous avons fait des deutérations progressives des échantillons et nous avons admis que nous avions effectivement le spectre OD de HOD, c'est-à-dire dans la terminologie choisie, le spectre de groupements découplés, tant que n'apparaissait pas sur l'enregistrement de bande de déformation angulaire de D_2O. Quant au spectre des molécules découplées, nous avons admis qu'il correspondait aux enregistrements où les bandes de déformation angulaire de H_2O ou D_2O pouvaient juste être détectées.

L'utilisation du tableau de SEIDL *et al.* (1969) implique le dénombrement de toutes les bandes existantes. Son application est rendue difficile dans le cas de l'eau adsorbée sur les argiles, car il existe toujours plusieurs types de molécules d'eau dont les bandes d'absorption sont souvent larges et, par conséquent, mal résolues.

La résolution de deux bandes dépend avant tout de l'écart de fréquence $\Delta\nu$ entre les maximums et de la largeur à mi-hauteur des bandes $\Delta\nu_{1/2}$. LUCK et DITTER (1967-68) précisent que, dans le cas de deux bandes ayant le même coefficient d'extinction, on observe seulement une bande, si $\Delta\nu < 0{,}85\ \Delta\nu_{1/2}$. Dans ces conditions, seule la position du maximum apparent varie en fonction de l'intensité

relative des bandes. Par ailleurs, PERRAM (1968) a montré qu'une bande gaussienne peut être la somme de deux bandes composantes, elles-mêmes gaussiennes. En conséquence, la présence d'une bande d'absorption sur le spectre n'implique pas l'existence d'une bande unique.

TABLEAU 2

Calcul du nombre de bandes observables dans le cas de molécules de H_2O, D_2O ou HOD découplées par deutération partielle appartenant à un ensemble de molécules d'eau associées

Molécule découplée	Vibration	Fréquence approximative en cm^{-1}	Nombre de bandes observables selon la symétrie de la molécule d'eau avant deutération		Nombre de bandes observables lorsque parmi les n types de molécules d'eau m ont la symétrie C_s (1)
			C_{2v}	C_s	
H_2O	Valence OH	3 450*	2	2	$2n$
	déformation HOH	1 650	1	1	n
D_2O	Valence OD	2 550*	2	2	$2n$
	déformation DOD	1 215	1	1	n
HOD	Valence OH	3 450	1	2	$n + m$
	Valence OD	2 550	1	2	$n + m$
	déformation HOD	1 460	1	2	$n + m$

* Les vibrations de valence des molécules H_2O et D_2O découplées sont masquées par les vibrations de valence de HOD et ne peuvent pas être observées avec précision.

(1) n représente le nombre total de molécules d'eau différentes. Cette différenciation s'opère, soit à partir de la symétrie C_{2v} ou C_s des molécules, soit en fonction de l'intensité des liaisons hydrogène que contracte chacun des hydroxyles. Une molécule a la symétrie C_{2v} lorsque ses deux hydroxyles sont engagés dans des liaisons hydrogène de même intensité. En outre, une molécule a la symétrie C_s lorsque ses deux hydroxyles sont engagés dans des liaisons hydrogène d'intensité différente. Dans le cas où m de ces types différents de molécules d'eau ont la symétrie C_s, le nombre de bandes de vibration observables lorsque ces molécules d'eau sont découplées est de : $2(n - m) + 2m = 2n$ pour les vibrations de valence OH de H_2O ou OD de D_2O, et de $(n - m)$ pour les vibrations de valence de OH de HOD des molécules qui ont la symétrie C_{2v} et de $2m$ pour les vibrations de valence OH de HOD des molécules qui ont la symétrie C_s, ce qui fait au total $n - m + 2m = n + m$ pour les vibrations de valence OH ou OD de HOD.

Le choix des systèmes découplés utilisés pour dénombrer les types de molécules d'eau et leur symétrie, doit être par conséquent adapté à chaque situation. Pratiquement on écrit l'ensemble des équations qui figurent dans le tableau 2. Comme le système doit rendre compte de la totalité des bandes observées dans chaque cas, on retient pour le calcul de n et m les deux équations qui donnent les valeurs de n et $n + m$ les plus grandes.

4. — *Effets de la formation de liaisons hydrogène non équivalentes sur les fréquences de vibration de valence de l'eau*

Nous venons de rappeler l'effet de la formation de liaisons hydrogène non équivalentes sur la symétrie de la molécule d'eau et, par conséquent, sur le nombre des vibrations fondamentales des molécules H_2O, D_2O et HOD découplées. Il s'y ajoute un effet sur l'intensité et les fréquences des vibrations de valence.

Nous avons expliqué dans le paragraphe précédent, que le nombre des bandes de vibration de valence OH des molécules HOD, dépend de la symétrie avant deutération des molécules H_2O découplées.

Si les molécules H_2O découplées ont la symétrie C_{2v}, la suppression des couplages par substitution d'un des deux protons par un atome de deutérium, donne une seule bande de vibration de valence OH dont la fréquence est voisine de la moyenne des fréquences des modes normaux des molécules H_2O découplées. Ceci est en accord avec les résultats expérimentaux présentés par BELLAMY *et al.* (1971). Nous admettrons dans la suite, que la fréquence de la bande de vibration de valence OH des molécules HOD résultant de la deutération partielle de molécules H_2O découplées de symétrie C_{2v}, est la fréquence propre de l'oscillateur OH qui constitue ces molécules. Nous traiterons ce groupe OH de HOD comme un groupement fonctionnel. Les fréquences des modes normaux de ces molécules H_2O, situées de part et d'autre de la fréquence propre de l'oscillateur OH, apparaissent alors comme la conséquence du couplage entre les deux oscillateurs OH composant la molécule.

Si, maintenant, les molécules H_2O découplées ont la symétrie C_s, la suppression des couplages par substitution d'un des deux protons de la molécule par un atome de deutérium, donne deux bandes de vibration de valence OH. Les fréquences de ces bandes sont déplacées du même nombre de cm^{-1} vers la fréquence moyenne des modes normaux des molécules H_2O découplées. Ceci est en accord avec les résultats expérimentaux présentés par BELLAMY et PACE (1972).

Nous admettrons par la suite que les fréquences des bandes de vibration de valence des molécules HOD résultant de la deutération partielle de molécules H_2O découplées de symétrie C_s, sont les fréquences propres des oscillateurs OH qui constituent ces molécules. Nous les traiterons comme des groupements fonctionnels. Les fréquences des modes normaux de ces molécules H_2O découplées, situées de part et d'autre des fréquences propres des oscillateurs OH, apparaissent alors comme la conséquence du couplage résiduel entre les deux oscillateurs OH qui constituent la molécule.

Sans indiquer clairement la nature des couplages mis en cause, BELLAMY et PACE (1972) précisent que l'écart entre les fréquences propres des oscillateurs OH découplés est une mesure de la différence des forces des liaisons hydrogène que contractent les hydroxyles des molécules H_2O découplées de symétrie C_s.

Enfin d'après BELLAMY et PACE (1972), l'écart entre les fréquences propres des oscillateurs OH découplés et les fréquences des modes normaux des molécules H_2O découplées, est une mesure de l'intensité du couplage résiduel entre les deux oscillateurs OH qui constituent la molécule.

Nous avons montré dans ce chapitre comment il est possible de rendre compte, à partir de la notion de couplage du spectre de molécules d'eau associées par des

liaisons hydrogène de force différente. C'est ce concept que nous utiliserons dans la suite de notre travail.

Pratiquement, deux cas doivent être envisagés : celui où la molécule d'eau n'a qu'un seul hydroxyle inclus dans une liaison hydrogène (complexe 1 : 1) et celui où les deux groupes OH de la molécule d'eau sont inclus dans des liaisons hydrogène de forces différentes (complexe 2 : 1).

a) *Complexes 1 : 1.*

D'après BELLAMY et PACE (1972) le couplage entre les deux groupes OH est d'autant plus réduit que les liaisons hydrogène sont de force différente. Par ailleurs, la formation de complexes 1 : 1 avec l'eau, entraîne un déplacement en fréquence de la bande à plus haute fréquence relativement faible, comparé à celui de la bande basse fréquence (SAUMAGNE, 1970 ; BELLAMY *et al.*, 1971). Enfin, la bande à plus haute fréquence reste fine tandis que la bande à plus basse fréquence s'élargit et augmente d'intensité.

b) *Complexes 2 : 1.*

D'après ces mêmes auteurs la formation d'une seconde liaison hydrogène affaiblit la liaison hydrogène existante.

5. — *Utilisation de la deutération partielle pour l'étude des groupes OH découplés*

Lorsque le taux de substitution des protons de l'eau par des atomes de deutérium est suffisant pour que la probabilité d'avoir deux groupes OH voisins reste faible, on peut alors considérer que le spectre d'absorption des groupes OH est celui de groupements fonctionnels. Cette notion présente plusieurs aspects intéressants.

a) *Étude du caractère dichroïque.*

Comme il est précisé plus loin, les spectres infrarouges de l'eau adsorbée sur l'argile, sont obtenus avec des dépôts orientés. L'axe *c* de chacun des petits monocristaux qui constituent le dépôt est voisin de la normale au plan du dépôt ; les axes *a* et *b* occupent toutes les directions de ce plan.

Dans la mesure où les molécules d'eau situées près de la surface de l'argile possèdent une orientation induite par la surface du feuillet, leurs moments de vibration sont dirigés suivant les génératrices d'un cône, dont l'axe est la normale au plan du dépôt orienté.

L'absorption du rayonnement infrarouge non polarisé est, par conséquent, fonction de l'angle du moment de vibration avec la normale au plan de l'onde électromagnétique incidente. De ce fait, l'absorption du rayonnement infrarouge incident est modifiée lorsqu'on fait varier l'angle de la normale au plan du dépôt orienté avec la normale au plan de l'onde électromagnétique incidente.

Le caractère dichroïque désigne, la variation de l'intensité des bandes d'absorption, en fonction de l'angle de la normale au dépôt avec la direction du faisceau infrarouge incident.

Dans le cas de groupes OH découplés, le moment de vibration est pratiquement

confondu avec l'axe de la liaison O—H. Ainsi, dans l'éventualité où la bande d'absorption d'un groupe OH découplé est dichroïque, on peut en déduire l'angle du moment de vibration avec le plan de l'onde électromagnétique incidente.

b) *Calcul du rapport de deutération.*

Le calcul, puis l'utilisation du rapport de deutération, ne donnent de valeurs convenables que s'ils s'effectuent sur des bandes d'absorption de groupes découplés. Il est généralement pris égal à 1,36 (FARMER et RUSSELL, 1971).

c) *Détermination des distances O—O des liaisons hydrogène O—H....O. Estimation de la force des liaisons hydrogène.*

L'utilisation de diagrammes qui donnent la distance O—O en fonction de la fréquence de la vibration de valence des groupes OH (NAKAMOTO *et al.*, 1955 ; NOVAK, 1974), n'est valable que dans la mesure où elle s'effectue à partir des fréquences des groupes hydroxyles découplés.

B. — DESCRIPTION SOMMAIRE DES TECHNIQUES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE DE L'EAU ADSORBÉE SUR LES ARGILES PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE

Le principe des techniques utilisées a fait l'objet de plusieurs publications (PROST, 1969, 1974). Nous ne rappellerons ici que l'essentiel, concernant la préparation et le conditionnement des échantillons.

1. — *Préparation des échantillons*

Cette préparation doit répondre aux deux objectifs suivants : étude du dichroïsme des bandes d'absorption et possibilité de conditionnement en H_2O ou D_2O. Les films autoporteurs répondent parfaitement aux exigences citées plus haut.

a) *Préparation des films autoporteurs.*

Le film autoporteur est obtenu par évaporation lente d'une suspension d'argile sur une feuille de mylar. Le dépôt, qui est orienté dans le cas des smectites (hectorite), est séparé de son support en faisant glisser le dos de la feuille de mylar sur une arête vive.

La qualité des enregistrements obtenus avec ces films dépend naturellement des propriétés optiques du dépôt solide. L'étude de ces propriétés optiques a fait l'objet d'un travail publié (PROST, 1973) où nous proposons un moyen simple pour détecter l'effet Christiansen et des solutions pour en réduire les conséquences. Ce dernier point est particulièrement intéressant car certains des minéraux étudiés (natrolite, attapulgite et sépiolite) ne peuvent être soumis à un broyage trop poussé. Une solution satisfaisante consiste à préparer des dépôts homogènes de quelques μm d'épaisseur seulement.

b) *Aptitude des films autoporteurs à l'étude du caractère dichroïque des bandes d'absorption infrarouge.*

Dans le cas de films autoporteurs, préparés à partir de suspension d'hectorite, les particules élémentaires, qui ont la forme de rubans très plats, ont leur axe *c* voisin de la normale au plan du support. Par contre, les axes *a* et *b* des petits monocristaux prennent toutes les directions dans ce plan. En conséquence les vibrateurs attachés à chaque cristallite, qui ont une direction bien déterminée par rapport aux axes du monocristal, sont répartis dans des directions parallèles aux génératrices d'un cône. Dans ce cas, l'étude du dichroïsme ne peut donc permettre que la détermination de l'angle des vibrateurs avec le plan (*a*, *b*).

Nous avons vérifié que la formule établie par FRIPIAT *et al.* (1965) pour rendre compte de la variation d'intensité des bandes de vibration de valence des groupes OH de biotite en fonction

de l'angle d'incidence du faisceau sur le monocristal, pouvait être appliquée aux bandes de vibration de valence des groupes OH des films autoporteurs d'hectorite.

La formule suivante indique l'absorption lorsque le faisceau infrarouge non polarisé fait un angle α avec la normale au film.

$$A_\alpha = \log 2 - \log \left[e^{-\frac{2{,}3\ A_0}{\cos r}} + e^{-4{,}6\ A_0\ (tg^2 r \times tg^2 \nu + \frac{1}{2})\ \cos r} \right]$$

où : A_0 est l'absorption pour une incidence normale du faisceau sur le film ;
ν l'angle du moment de vibration avec le plan du film ;
r l'angle de réfraction.

La courbe représentant A_α en fonction ν a une forme exponentielle et, de ce fait, on n'observe que de faibles variations de A_α tant que ν reste inférieur à 30°. Par contre, lorsque ν est supérieur à 70°, A_α est alors très sensible à de petites variations de ν.

Compte tenu de l'importance que revêt la connaissance du caractère dichroïque des bandes d'absorption, tous les dispositifs expérimentaux que nous avons utilisés et décrits dans l'annexe, sont équipés de porte-échantillons orientables.

2. — *Conditionnement des films autoporteurs*

a) *Conditionnement en H_2O et en D_2O.*

Nous avons mis à profit le fait que la deutération des hydroxyles de l'eau adsorbée est sélective vis-à-vis des hydroxyles de constitution du minéral, lorsque la température ne dépasse pas 200°C.

Ces expériences sont faciles à réaliser avec les films autoporteurs qui peuvent être conditionnés par simple contact de l'échantillon avec la vapeur de H_2O ou D_2O. Toutes les expériences que nous avons réalisées ont été effectuées dans une cellule et à l'aide de dispositifs dont nous donnons les schémas et une description détaillée dans l'annexe publiée à la fin de la 2e partie.

La teneur en eau des échantillons est déterminée au moment même de l'enregistrement par pesée directe à l'aide d'une balance de quartz. Le dispositif utilisé est représenté par la figure 4 de l'annexe (1).

b) *Conditionnement en température.*

Il peut être fait, bien entendu, à l'air, dans un four, mais il est également possible de chauffer les échantillons en atmosphère contrôlée. Dans tous les cas, nous avons attendu que l'échantillon soit revenu à la température du spectrographe pour en faire l'enregistrement.

Par ailleurs, des enregistrements ont été réalisés à basse température. En effet, l'abaissement de température entraîne un déplacement des bandes de vibration de valence de l'eau vers les basses fréquences, d'autant plus important que les liaisons hydrogène qui associent les molécules d'eau entre elles sont intenses. Ceci revient à étirer le spectre vers les basses fréquences, avec pour effet d'accroître la résolution des bandes d'absorption situées à plus haute fréquence. Ce déplacement est progressif et on ne note pas de discontinuité aux teneurs en eau choisies pour les échantillons, dans le domaine de température que nous avons étudié (+ 40°C, — 125°C). Le dispositif utilisé est représenté par les figures 5 et 6 de l'annexe.

Les enregistrements ont été obtenus avec un appareil Beckman IR-7 ou IR-12.

Chapitre II

ÉTUDE DE L'EAU PRÉSENTE DANS LA NATROLITE, L'ATTAPULGITE ET LA SÉPIOLITE

Nous aborderons successivement dans ce chapitre, l'étude de l'eau présente dans la natrolite, l'attapulgite et la sépiolite. Cet ordre correspond à une complexité croissante des systèmes eau-argile.

(1) L'annexe sera publiée à la suite de la 2e partie de ce travail qui paraîtra dans le n° 5, 1975 des *Annales agronomiques*.

Pour chaque minéral l'étude comprend :

— Un rappel des données physico-chimiques et structurales essentielles que nous avons complétées en faisant de nouvelles expériences, chaque fois que cela était indispensable à une meilleure compréhension des relations eau-argile.

— Une étude des interactions eau-argile par spectroscopie infrarouge. Cette dernière se décompose en deux parties. On suit tout d'abord l'évolution des bandes d'absorption de l'eau et des hydroxyles de constitution du minéral en fonction de la teneur en eau de l'argile. Ceci, en vue de déterminer les différents états dans lesquels se trouvent les molécules d'eau, au cours de la déshydratation du minéral, mais aussi pour connaître les perturbations exercées par l'eau sur la fréquence des hydroxyles de constitution du minéral. Ensuite nous abordons, à l'aide de la technique de deutération partielle, l'étude de la structure et de l'arrangement des molécules d'eau dans chacun des états définis précédemment.

L'étude des relations eau-argile par spectroscopie infrarouge présente quelques difficultés. Les bandes d'absorption dues à l'eau sont généralement larges et donnent des spectres mal résolus. De plus, l'existence, en particulier dans le domaine 1 200-1 800 cm^{-1}, de bandes qui sont des harmoniques ou des bandes de combinaison de vibrations fondamentales du réseau, gêne l'interprétation des spectres dans cette région. En outre, le pouvoir adsorbant trés élevé des produits étudiés et plus particulièrement des minéraux fibreux entraîne presque toujours la présence sur le spectre de l'argile de bandes dues à des hydrocarbures, vers 1 300 et 2 900 cm^{-1} et à l'ion NH_4^+, aux alentours de 1 400 et 3 300 cm^{-1}. L'absence de réversibilité dans les mécanismes de la déshydratation et de la réhydratation des argiles partiellement déshydratées par chauffage, nous a souvent contraint à prendre plusieurs échantillons pour une même expérience. Il est en effet apparu nécessaire de toujours partir d'échantillons séchés à l'air, amenés à la teneur en eau désirée, par un seul traitement.

Seules les caractéristiques spectroscopiques qui ont un rapport avec l'étude des états de l'eau dans les minéraux étudiés, sont discutés ici. Nous nous proposons d'aborder l'interprétation plus complète des enregistrements obtenus, dans des articles qui paraîtront ultérieurement.

A. — La natrolite

1. — *Propriétés physico-chimiques du minéral*

L'échantillon de natrolite naturelle du Canada (Nouvelle Écosse) étudié, nous a été donné par Mlle Caillère du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris.

Ce tectosilicate se présente sous la forme d'aiguilles très fines de quelques millimètres de long et de 0,1 à 5 micromètres d'épaisseur. Sa formule générale est : $Na_2Al_2Si_3O_{10}$, $2H_2O$.

L'analyse thermopondérale et l'analyse thermique différentielle indiquent clairement l'existence d'une seule catégorie de molécules d'eau dont la température de départ est voisine de 300°C (Peng, 1955).

La structure de la natrolite a été établie de manière précise par Meier (1960). La figure 3 montre l'arrangement des tétraèdres et la place occupée par les ions Na^+ et les molécules d'eau à l'intérieur des canaux.

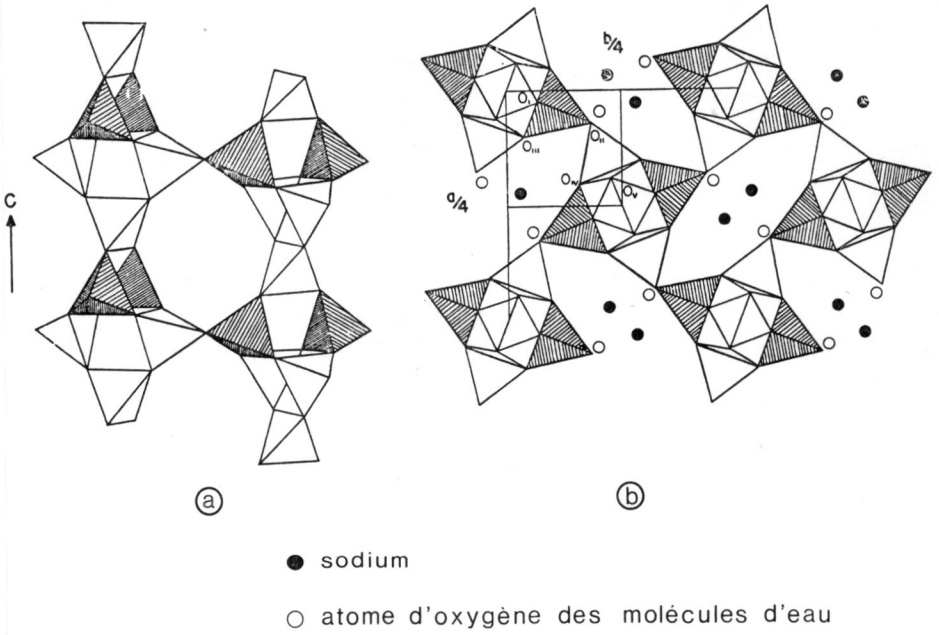


FIG. 3. — *Structure de la natrolite*

a : Association montrant les chaînes de tétraèdres de AlO_4 (hachurés) et SiO_4
b : Projection sur le plan (001). Les tétraèdres AlO_4 sont hachurés

Par ailleurs des mesures par diffraction de neutrons ont permis à TORRIE *et al.* (1964) de préciser la position des atomes d'hydrogène des molécules d'eau. Ces auteurs ont montré que chaque orbitale libre de l'eau est dirigée vers un ion Na^+ et que les protons sont tournés vers les atomes d'oxygène du réseau (fig. 4). L'esti-

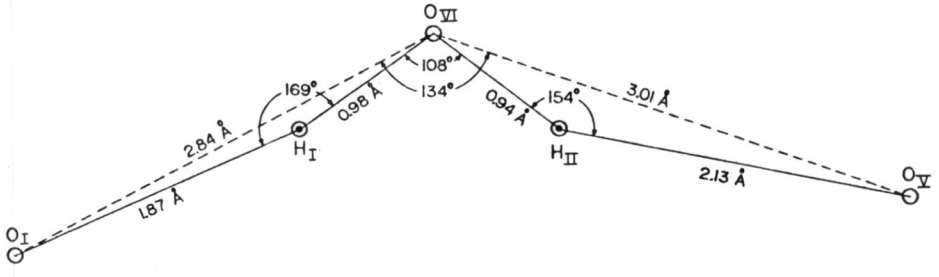


FIG. 4. — *Configuration de la molécule d'eau et des atomes d'oxygène voisins dans la natrolite*

Les atomes d'hydrogène se trouvent presque dans le plan O—O—O

mation précise des distances entre l'atome d'oxygène de l'eau et les atomes d'oxygène du squelette indique que l'un des deux groupes hydroxyles est inclus dans une liaison hydrogène.

2. — *Étude de l'eau présente dans la natrolite par spectroscopie infrarouge*

La figure 5 rassemble le spectre de l'eau présente dans la natrolite et les spectres correspondant à une deutération progressive de cet échantillon.

Le spectre infrarouge de l'eau présente dans la natrolite (fig. 5 *a*) est identique à celui publié par PANESH *et al.* (1967) et par OTSUKA *et al.* (1970).

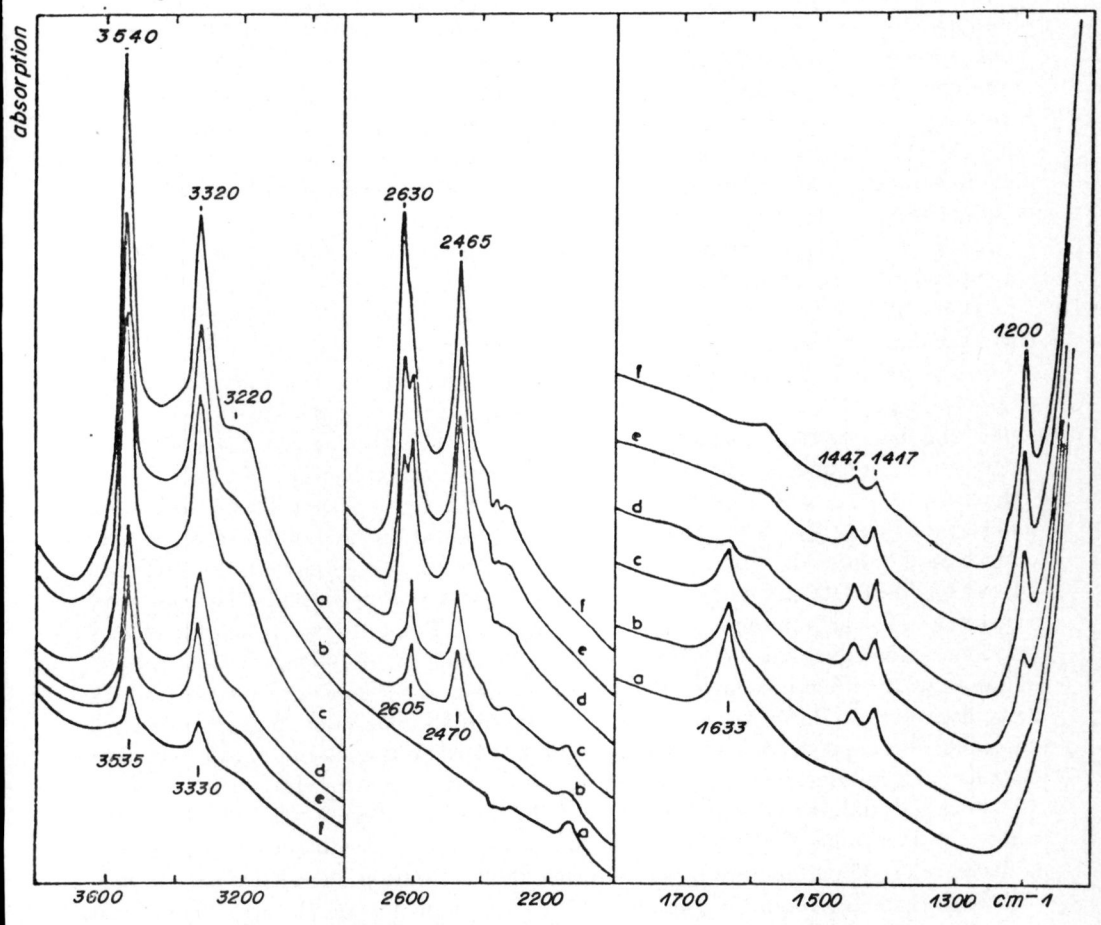


FIG. 5. — *Spectre infrarouge de l'eau présente dans la natrolite pour des taux de substitution des protons par des atomes de deutérium croissants* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*)

Au cours de la deutération progressive, lorsque le taux de substitution de H par D est suffisant pour qu'il y ait formation de quelques molécules de D_2O, isolées par conséquent au milieu de molécules H_2O ou HOD, il n'apparaît qu'une seule bande de déformation angulaire de D_2O découplée (fig. 5 *c*). Réciproquement lorsque le taux de substitution de D par H est suffisant pour qu'il y ait formation de quelques molécules de H_2O, isolées au milieu de molécules de D_2O et HOD, il n'apparaît qu'une

seule bande de déformation angulaire de H_2O découplée (fig. 5 *d*). Ces résultats indiquent clairement l'existence d'une seule catégorie de molécules d'eau dans la natrolite, ce qui est conforme aux résultats de l'analyse thermopondérale.

Lorsque le taux de substitution de H par D est tel qu'il n'y a plus de bande de déformation angulaire de H_2O détectable (fig. 5 *f*), nous avons alors le spectre de groupements OH découplés, désignés plus couramment sous le nom de spectre OH de HOD. Réciproquement, lorsque le taux de substitution de D par H est tel qu'il n'y a plus de bande de déformation angulaire de D_2O détectable (fig. 5 *b*), nous obtenons alors le spectre de groupements OD découplés appelés aussi plus couramment, spectre OD de HOD. Les spectres OH ou OD de HOD sont caractérisés par la présence de deux bandes de vibration de valence à 3 330, 3 535 cm^{-1} et leurs homologues à 2 470, 2 605 cm^{-1}, et par deux bandes de vibration de déformation angulaire à 1 417, 1 447 cm^{-1}. Ces résultats analysés suivant les indications rassemblées dans le tableau 2, montrent que les molécules d'eau présentes dans la natrolite ont la symétrie C_s. On distingue deux types d'hydroxyles :

a) les hydroxyles fortement associés par liaison hydrogène et dont la bande correspondante est située du côté des basses fréquences, vers 3 330 cm^{-1} ;

b) les hydroxyles faiblement associés par liaison hydrogène et dont la bande correspondante est située du côté des hautes fréquences à 3 535 cm^{-1}.

Au cours de la deutération, lorsque la probabilité d'avoir des molécules de D_2O augmente (spectres *c*, *d*, *e* et *f* de la figure 5 entre 2 000 et 2 800 cm^{-1}), il se développe une bande résolue située à 2 630 cm^{-1}. Par contre, dans la région 3 000-4 000 cm^{-1}, lorsque la probabilité d'avoir des molécules de H_2O augmente (spectres *f*, *e*, *d*, *c*, *b* et *a* de la figure 5) on observe un déplacement du maximum d'absorption de 3 535 à 3 540 cm^{-1}. Cette augmentation de l'écart entre les fréquences des bandes de vibration de valence des hydroxyles, en passant des systèmes OH ou OD de HOD aux systèmes H_2O ou D_2O, est due à un couplage entre les deux hydroxyles de la molécule d'eau (Bellamy et Pace, 1972). L'écart entre les fréquences des vibrations de valence de OH de HOD ou de OD de HOD traduit, quant à lui, la différence entre les forces des liaisons hydrogène que contractent les deux hydroxyles. Enfin, d'après Bellamy et Pace, nous pouvons conclure à un découplage presque total entre les deux hydroxyles de la molécule d'eau, par suite de la formation d'une liaison hydrogène par un seul de ses hydroxyles.

Pour déterminer la distance O—O de la liaison hydrogène O—H....O nous avons utilisé le diagramme établi par Nakamoto *et al.* (1955). Ce diagramme représente la distance O—O en fonction de la fréquence de la vibration de valence des groupes OH. Pour cette détermination, nous avons pris les fréquences de vibration de valence des groupes OH de HOD (chap. I, § A, 5). On trouve qu'à la fréquence de 3 535 cm^{-1} correspond une distance O—O de 2,94 Å et à 3 330 cm^{-1} une distance O—O de 2,82 Å. Les valeurs trouvées sont en bon accord avec celles données par Torrie *et al.* (1964), soit respectivement 3,01 Å et 2,84 Å (fig. 4).

Nous attribuons la bande à plus basse fréquence (3 320 cm^{-1}), qui correspond à la distance O—O la plus courte, aux hydroxyles dirigés vers les atomes d'oxygène appartenant à des tétraèdres dont le centre est occupé par des ions Al^{+++}. Cette substitution de Si^{++++} par Al^{+++}, qui entraîne nécessairement l'apparition d'une surcharge négative sur chacun des atomes d'oxygène qui forment le tétraèdre, est à l'origine, pour la molécule d'eau, de liaisons hydrogène non équivalentes (fig. 4).

Les deux orbitales libres de l'atome d'oxygène de l'eau sont tournées chacune vers un atome de Na^+ (TORRIE *et al.*, 1964). Dans ce minéral l'eau possède par conséquent un arrangement tétraédrique.

Pour terminer, nous signalons la disparition simultanée au cours de la deutération de l'épaulement à 3 220 cm^{-1} et de la bande de déformation angulaire à 1 633 cm^{-1}. Cette évolution constitue un argument pour attribuer la bande à 3 220 cm^{-1}, à l'harmonique $2\nu_2$ de la bande de déformation angulaire ν_2 située à 1 633 cm^{-1}.

B. — L'ATTAPULGITE

1. — *Propriétés physico-chimiques du minéral*

Plusieurs échantillons ont été étudiés. Nous ne présenterons que les résultats qui concernent l'attapulgite de Serradilla (Espagne). Cet échantillon nous a été fourni par le Pr SERRATOSA du Consejo Superior de Investigaciones Cientificas à Madrid.

Morphologie.

L'attapulgite étudiée a un aspect crypto-cristallin différent de celui de carton bouilli évoqué pour d'autres échantillons de la famille des attapulgites-palygorskites.

Analyse thermopondérale.

L'étude de la déshydratation de l'attapulgite ou de la palygorskite par analyse thermopondérale (LONGCHAMBON, 1936 ; CAILLÈRE et HÉNIN, 1961 ; NATHAN, 1969 ; HAYASHI *et al.*, 1969 ; VENIALE, 1972, etc.) montre qu'il existe plusieurs états pour l'eau présente dans ces minéraux. La courbe représentée sur la figure 6 a été obtenue

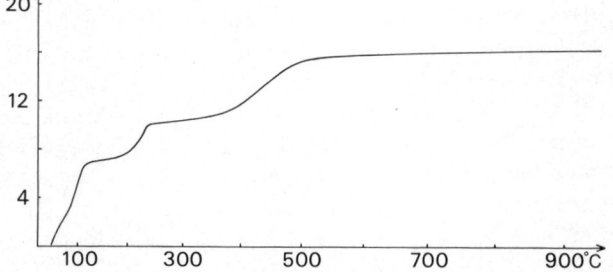


FIG. 6. — *Courbe d'analyse thermopondérale de l'attapulgite*

à partir d'un échantillon d'attapulgite de Serradilla débarrassé, par dissolution dans l'eau, du carbonate de calcium qu'il contient naturellement. L'élimination de l'eau se fait en quatre étapes successives. Les domaines de température ainsi que les pertes correspondant à chacune de ces étapes sont rassemblés dans le tableau 3.

On distingue, comme le rappellent CAILLÈRE et HÉNIN (1961) :

— l'eau zéolitique qui occupe la partie centrale des canaux,
— l'eau de cristallisation qui est liée aux cations octaédriques situés au bord des lattes,
— l'eau de constitution du minéral.

On remarque que la quantité d'eau zéolitique déterminée à partir de l'analyse thermopondérale de l'échantillon naturel ou traité est faible si on la compare aux valeurs données par CAILLÈRE et HÉNIN (1961).

TABLEAU 3

Résultats de l'analyse thermopondérale de l'attapulgite de Serradilla traitée afin d'éliminer le $CaCO_3$

	Température de départ en °C	Pertes exprimées en p. 100 de l'échantillon calciné
H_2O zéolitique	< 80	3,2
	80-150	4,1
H_2O de cristallisation	150-300	3,4
H_2O de cristallisation + groupes OH de constitution	> 300	6

Composition chimique.

La formule de l'attapulgite de Serradilla a été établie à partir des résultats de l'analyse chimique publiée par ALVAREZ-ESTRADA et SANCHEZ-CONDÉ (1967). Nous avons considéré, comme le suggèrent les auteurs de l'analyse, que la totalité de l'oxyde de calcium provient du $CaCO_3$ contenu dans le minéral naturel. Une analyse effectuée au carmhographe donne une proportion de $CaCO_3$ compatible avec la quantité de CaO trouvée par analyse chimique. Enfin le traitement à l'eau de l'échantillon fait disparaître, sur la courbe d'analyse thermopondérale, un dernier départ à 640°C, dont l'importance est aussi compatible avec la quantité de CaO trouvée par analyse chimique.

La formule a été calculée sur la base de 21,5 atomes d'oxygène par demi-maille [1] en appliquant la méthode développée par CAILLÈRE et HÉNIN (1963).

$$[Si_8^{++++}] \; [Al_{2,1}^{+++} \; Mg_{1,7}^{++} \; Fe_{0,2}^{+++} \; Ti_{0,15}^{++++}] \; [OH_2^-] \; [OH^-, \; H_2O] \; [(H_2O)_2] \; [O_{20}^{--}] \; [K_{0,1}^+]$$

L'eau de cristallisation est incluse dans la formule.

[1] Le meilleur accord obtenu en faisant le calcul sur la base de 21,5 atomes d'oxygène correspond probablement au fait qu'un certain nombre de molécules d'eau de cristallisation sont remplacées par des groupes OH.

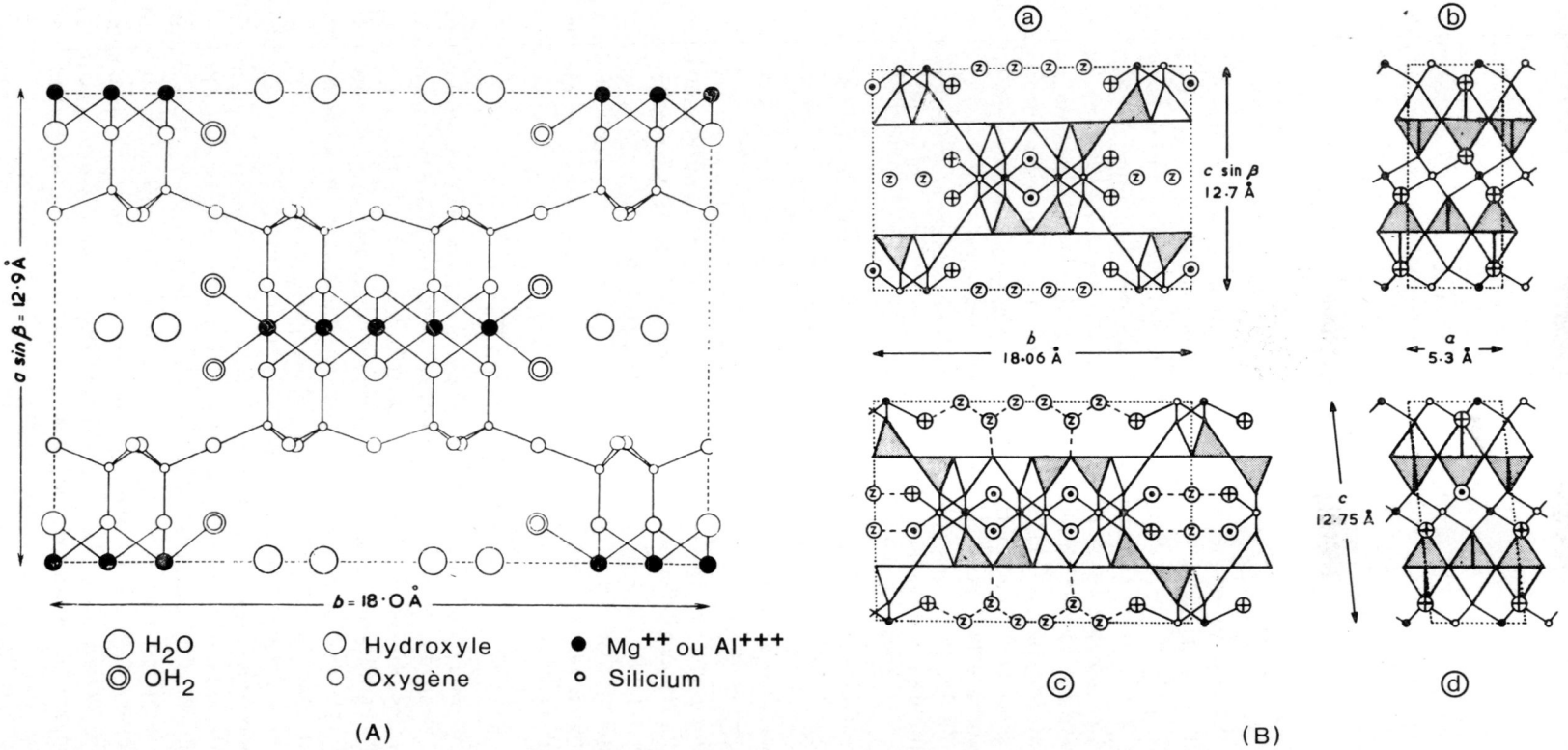


FIG. 7. — *Structure de l'attapulgite*

A : Projection sur le plan (001) de la maille d'attapulgite (BRADLEY, 1940)
B : Projections sur le plan (001) et sur le plan (010) de la maille d'attapulgite

a et *b* : d'après HUGGINS *et al.* (1962)
c et *d* : d'après GARD et FOLLETT (1968)

Cette formule conduit à une capacité d'échange de cation de 14 méq./100 g voisine de celle de 11 méq./100 g trouvée expérimentalement par ALVAREZ-ESTRADA et SANCHEZ-CONDE (1967). Enfin, la formule que nous proposons est assez proche de la formule idéale déterminée par GARD et FOLLETT (1968) :

$$Mg\ Al_3\ SI_8\ O_{20}\ (OH)_3\ (OH_2)_3,\ 4\text{-}5\ H_2O$$

Structure.

Plusieurs auteurs ont contribué à l'élaboration de la structure des minéraux de la famille de l'attapulgite et de la palygorskite (BRADLEY, 1940 ; DRITS et ALEXANDROVA, 1966 ; GARD et FOLLETT, 1968, etc.). La figure 7 rassemble les schémas proposés par deux de ces auteurs. A la différence du schéma proposé par BRADLEY, nous trouvons comme DRITS et ALEXANDROVA et GARD et FOLLETT que l'attapulgite présente un nombre élevé de lacunes octaédriques. Ce résultat est confirmé par les études de spectroscopie infrarouge qui montrent que les fréquences de vibration de valence et de déformation des groupes OH sont voisines de celles que l'on observe habituellement pour les minéraux dioctaédriques.

Nous ne développerons par la suite que les aspects de la structure en rapport avec l'hydratation des argiles.

2. — *Identification et étude par spectroscopie infrarouge des états de l'eau au cours de la déshydratation du minéral*

a) *Évolution du spectre d'absorption infrarouge de l'eau présente dans l'attapulgite en fonction de la teneur en eau du minéral.*

L'expérience a été réalisée à l'aide du montage représenté par la figure 4 de l'annexe. Ce dispositif permet la pesée de l'échantillon au cours même de l'enregistrement. L'argile est sous forme de film autoporteur.

La superposition des bandes d'absorption du réseau de l'argile et des bandes de l'eau nous a amené à faire l'expérience sur l'échantillon non deutéré (fig. 8) et sur l'échantillon deutéré (fig. 9).

1. *Déshydratation par chauffage sous vide à 150°C.*

L'élimination d'une partie de l'eau par mise sous vide de l'échantillon (spectre *b* de la fig. 8 A) entraîne la diminution simultanée de la bande de déformation angulaire de H_2O à 1 655 cm^{-1} et des bandes de vibration de valence de H_2O à 3 280-3 380 et 3 550 cm^{-1}. Parallèlement, on observe une augmentation de la densité optique à 1 620-1 626 cm^{-1} et à 3 630 cm^{-1} et l'apparition d'une nouvelle bande à 3 518 cm^{-1}. Ces résultats sont en accord avec ceux publiés par OTSUKA *et al.* (1968), HAYASHI *et al.* (1969) et TARASEVICH (1970, 1971).

L'examen des enregistrements obtenus lorsque l'eau a été préalablement deutérée, montre que la déshydratation par mise sous vide ne conduit pas à l'élimination complète des bandes à 2 490 et 2 626 cm^{-1} (spectre *d* de la fig. 9). Pour y arriver, il est nécessaire de chauffer l'échantillon sous vide à une température de l'ordre de 150°C (spectre *e* de la fig. 9). Dans ces conditions on obtient dans le domaine des vibrations de déformation angulaire de D_2O, deux bandes à 1 202 et 1 216 cm^{-1} et, dans le domaine des vibrations de valence, deux bandes à 2 580 et 2 694 cm^{-1}.

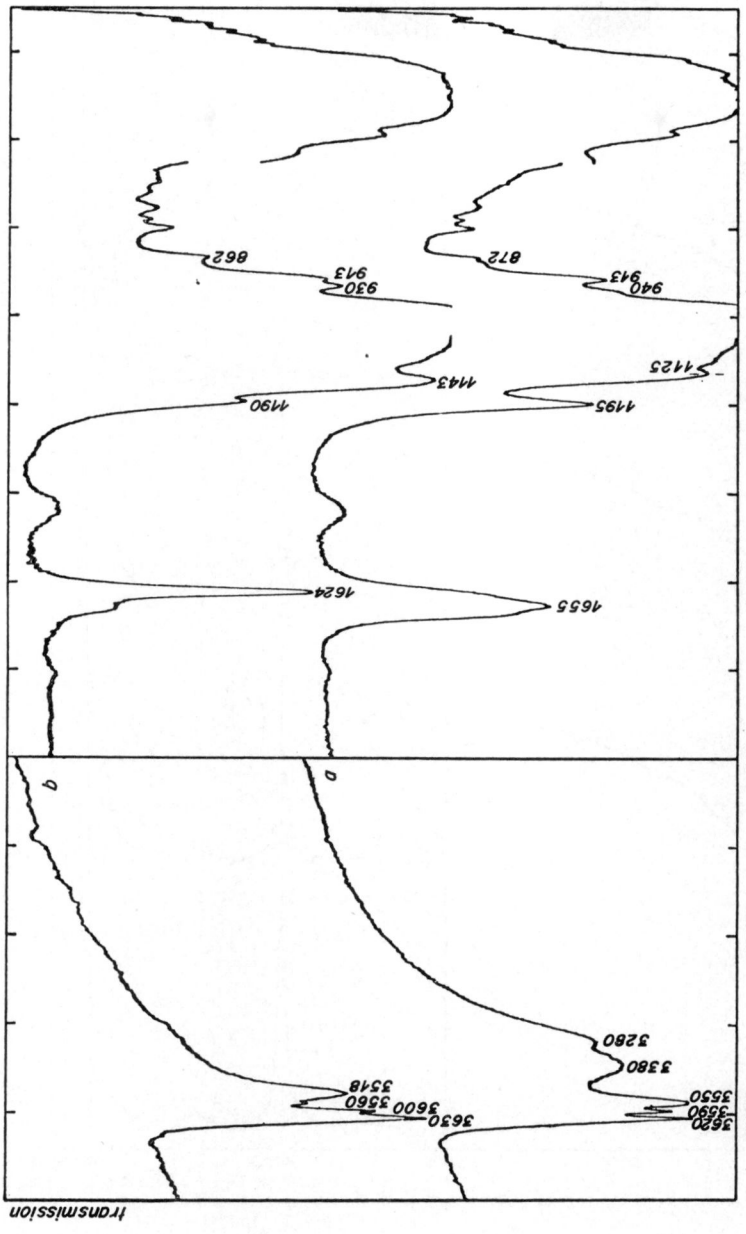


FIG. 8 A. — *Spectre infrarouge de l'attapulgite*
a : séchée à l'air
b : déshydratée par mise sous vide

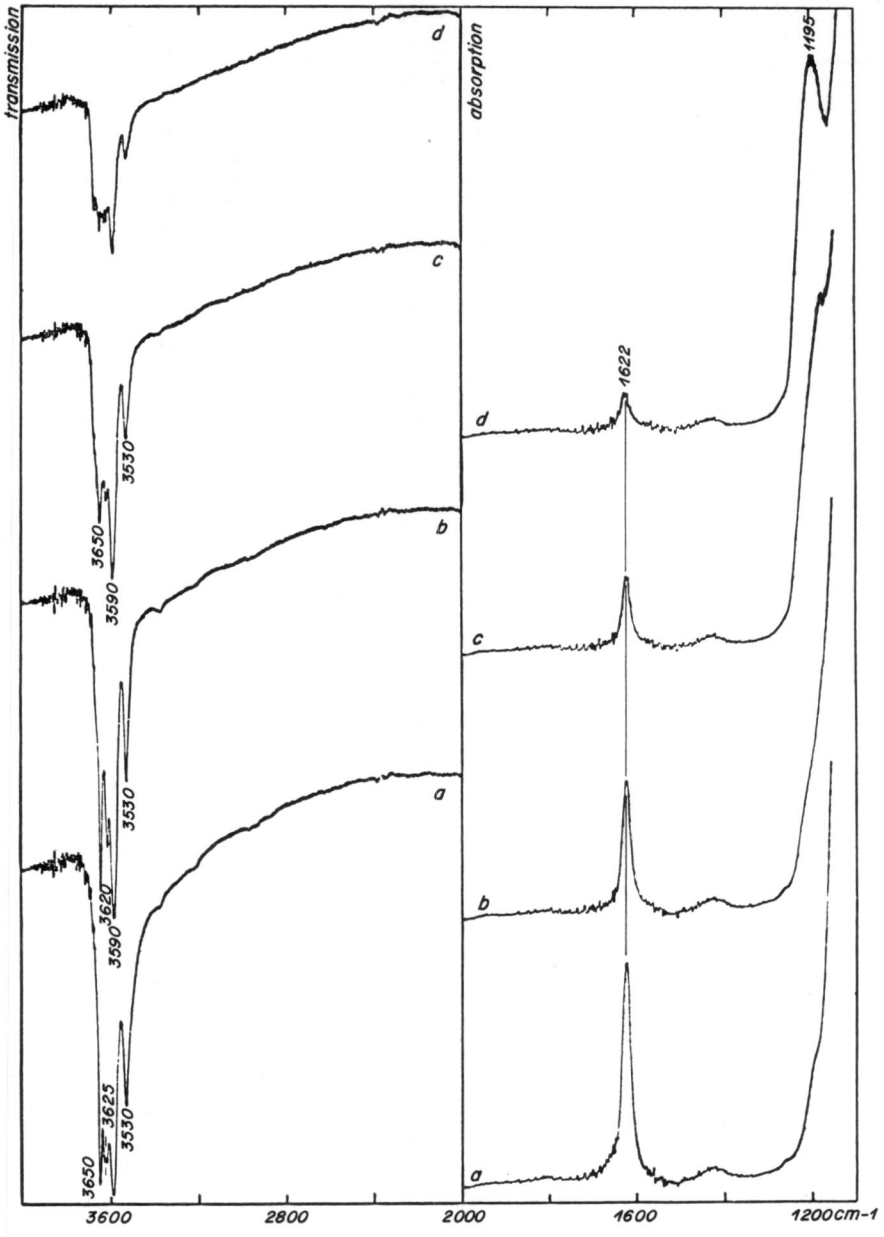


FIG. 8 B. — *Spectre infrarouge de l'attapulgite pour des teneurs en eau décroissantes*
a : 11 p. 100 ; *b* : 7 p. 100 ; *c* : 5 p. 100 ; *d* : 4 p. 100

Le détail du spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution est représenté sur la fig. 8 C

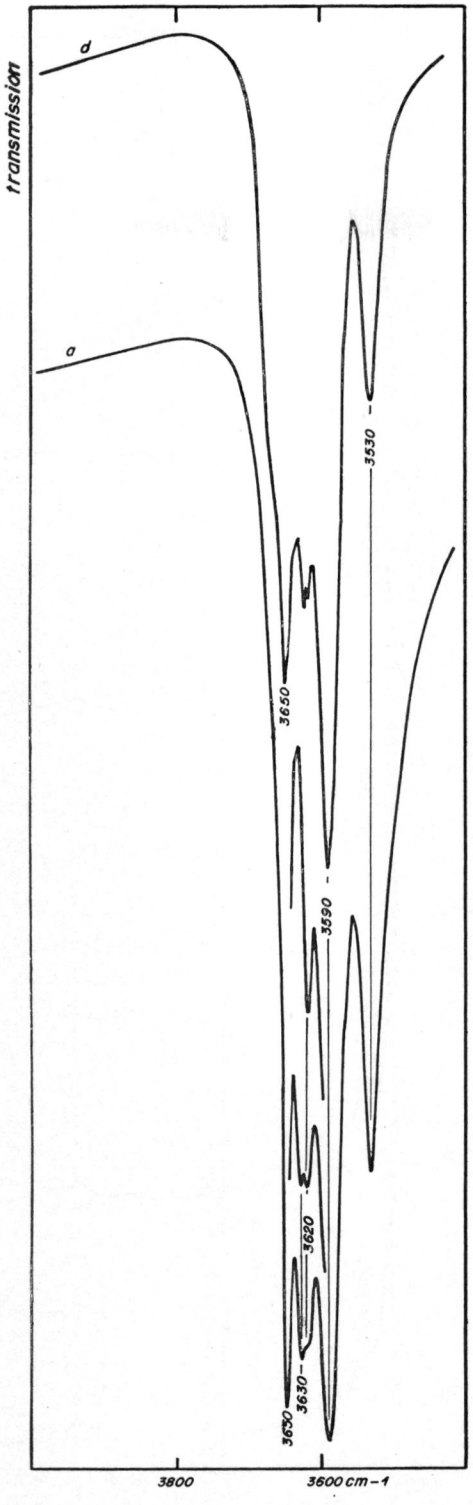


FIG. 8 C. — *Détails de l'évolution du spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de l'attapulgite pour des teneurs en eau décroissantes*

a : 12 p. 100 ; *b* : 11 p. 100 ; *c* : 9 p. 100 et *d* : 5 p. 100

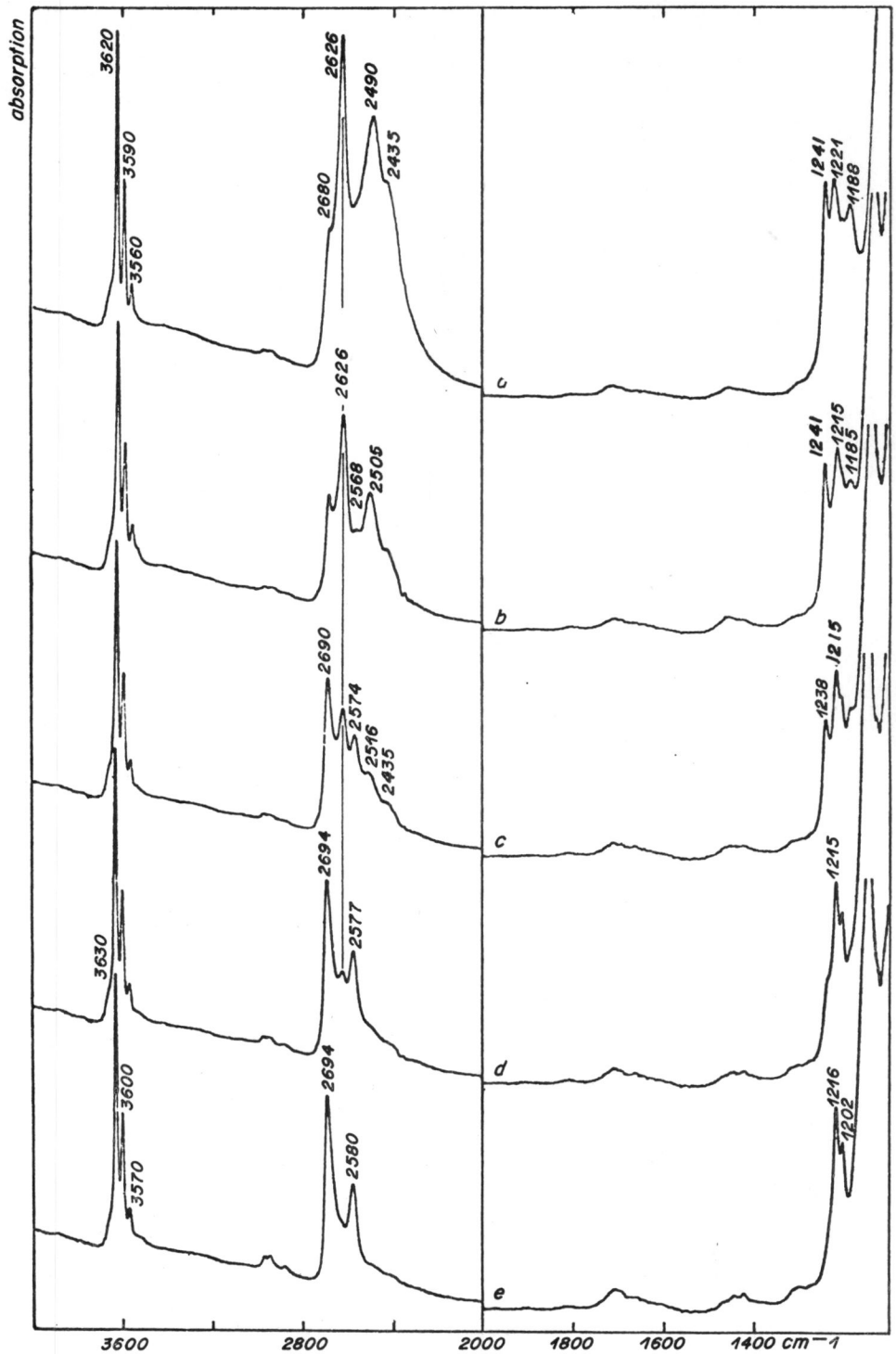


FIG. 9. — *Spectre infrarouge de l'attapulgite pour des teneurs en D_2O décroissantes*

L'état de l'eau ainsi défini, correspond à l'eau qui reste sur l'argile quand on considère le milieu du premier palier de la courbe d'analyse thermopondérale, c'est-à-dire lorsque la totalité de l'eau zéolitique est éliminée.

L'élimination de l'eau zéolitique entraîne l'apparition d'une seule bande de déformation angulaire à 1 622 cm^{-1} et d'une bande de vibration de valence à 3 522 cm^{-1} (spectre *a* de la fig. 11), ainsi que l'augmentation de densité optique à 3 630 cm^{-1}, au détriment des bandes situées à 1 655 cm^{-1}, 3 280-3 380 et 3 550 cm^{-1}. Le spectre d'absorption qui en résulte est dû aux molécules d'eau de cristallisation. Les valeurs des fréquences de vibration de valence et de déformation indiquent (chap. I, A, 2) que ces molécules d'eau contractent des liaisons hydrogène faibles par l'intermédiaire de leurs deux hydroxyles ou, par le biais d'un seul. Le déplacement du maximum apparent de la bande de vibration de déformation angulaire de 1 624-1 626 à 1 622 cm^{-1} correspond à l'élimination des dernières molécules d'eau zéolitiques, liées aux molécules d'eau de cristallisation. L'évolution générale du spectre de l'eau présente dans l'attapulgite, et en particulier le développement important de l'absorption à 1 622 cm^{-1}, quand on déshydrate le minéral, montrent que les molécules d'eau de cristallisation contractent, sur les systèmes hydratés, des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau zéolitiques.

2. *Déshydratation par chauffage sous vide à 250°C.*

Lorsque l'échantillon est déshydraté par chauffage sous vide à 250°C, ce qui correspond au deuxième palier de la courbe thermopondérale, de profonds changements interviennent dans le spectre de l'attapulgite. On note en particulier la transformation du doublet à 2 580-2 694 cm^{-1} (spectre *e* de la fig. 9) en un autre doublet à 2 585-2 670 cm^{-1} (spectre *d* de la fig. 13). On observe de même dans la région OH (spectre *a* de la fig. 8 B) deux bandes à 3 530 et 3 590 cm^{-1} dont l'intensité diminue avec la teneur en eau (spectres *b*, *c* et *d* de la fig. 8 B). Les bandes de vibration de déformation angulaire correspondantes sont à 1 198 et 1 622 cm^{-1}.

Le chauffage sous vide à 250°C (spectre *a* de la fig. 8 B) entraîne le basculement des lattes (PREISINGER, 1961). Ce basculement se produit alors qu'une partie seulement de l'eau de cristallisation est éliminée (NATHAN, 1969). Le spectre infrarouge de l'eau de cristallisation qui reste après ce traitement indique que les molécules d'eau sont dans un état différent de celui où elles se trouvaient précédemment.

L'étude de l'évolution des spectres de l'eau deutérée et non deutérée, en fonction de l'état d'hydratation du minéral, montre que l'eau se présente sous trois états différents suivant la teneur en eau de l'argile. Chacun de ces états est caractérisé par son spectre infrarouge. Le tableau 4 précise les conditions de déshydratation correspondant à chacun des états et les caractéristiques spectroscopiques des molécules d'eau appartenant à chacun d'eux.

b) *Évolution du specte d'absorption infrarouge du réseau de l'attapulgite en fonction de la teneur en eau du minéral.*

1. *Au niveau des groupes OH de constitution de l'argile.*

L'élimination de l'eau zéolitique entraîne des modifications dans les fréquences de vibration des hydroxyles de constitution du minéral. C'est ainsi que les bandes

TABLEAU 4

Tableau récapitulatif des états de l'eau dans l'attapulgite (1)

État de l'eau	Conditions de déshydratation	Fréquences de vibration des molécules d'eau en cm^{-1}				Nature et symétrie des molécules d'eau	Fréquence de vibration de valence des groupes OH de constitution en cm^{-1}		Origine de la perturbation des groupes OH de constitution
		vibrations OH		vibrations OD					
		déformation	valence	déformation	valence		déformation	valence	
I	séchée à l'air	1 655 1 630 (épaulement)	3 280 3 380 3 550	1 241 1 221	2 435 2 490 2 626	zéolitiques et de cristallisation (C_{2v} et C_s)	940 872	3 560 3 590 3 620	molécules d'eau zéolitiques
II	chauffage sous vide à 150°C	1 622	3 522	1 216	2 580 2 694	de cristallisation (C_s)	930 862	3 570 3 600 3 630	....
III	chauffage sous vide à 250°C (basculement des lattes)	1 622	3 530 3 590	1 198	2 585 2 670	de cristallisation (C_{2v})		3 590 3 620 3 650	molécules d'eau de cristallisation changement de structure

(1) Ce tableau rassemble aussi des données discutées dans le paragraphe suivant.

à 3 560, 3 590 et 3 620 cm^{-1} qui correspondent à des groupes OH liés respectivement à (R, R) ou (R, Fe^{+++}) ou (Fe^{+++}, Fe^{+++}) (PROST, à paraître) où R représente un cation autre que le fer, se déplacent à 3 570, 3 600 et 3 630 cm^{-1} (spectres *a* et *e* de la fig. 9). Parallèlement, on observe dans la région des vibrations de déformation des hydroxyles (spectres *a* et *b* de la fig. 8 A), le déplacement des bandes situées vers 940 et 872 cm^{-1} respectivement vers 930 et 862 cm^{-1}. Ainsi le déplacement des bandes de vibration de valence des hydroxyles vers les hautes fréquences entraîne bien un déplacement des bandes de vibration de déformation de ces mêmes hydroxyles vers les basses fréquences. Ces déplacements de fréquence ne peuvent être que la conséquence d'une perturbation des hydroxyles de constitution du minéral par l'eau, puisque tous les hydroxyles sont perturbés, alors qu'il y a très peu de cations compensateurs sur la surface des feuillets.

Au stade suivant de la déshydratation (spectre *d* de la fig. 13) apparaît une nouvelle bande à 3 650 cm^{-1}. Son développement est accompagné de la diminution simultanée des bandes attribuées aux hydroxyles de constitution du minéral.

On observe parallèlement au développement de la bande à 3 650 cm^{-1}, le déplacement de la bande à 3 630 cm^{-1} vers 3 620 cm^{-1} (spectre *a* de la fig. 8 B, spectres *a*, *b* et *c* de la fig. 8 C). Le déplacement est complet quand l'échantillon a été chauffé sous vide à une température voisine de 250°C pendant dix minutes (spectre *d* de la fig. 13). Ce traitement thermique, qui correspond au deuxième palier de la courbe thermopondérale, entraîne à nouveau la perturbation des groupes OH de constitution. Il est difficile de suivre l'évolution de la bande à 3 620 cm^{-1} en continuant l'évacuation des dernières molécules d'eau de cristallisation, car il se produit en même temps, un début de déshydroxylation de l'attapulgite. SERNA, qui a pu chauffer le même échantillon d'attapulgite à 450°C sous un vide de 10^{-4} mm de Hg, n'obtient plus qu'une seule bande de vibration de valence à 3 630 cm^{-1} (communication personnelle). En conséquence, le déplacement de la bande de 3 630 cm^{-1} vers 3 620 cm^{-1}, puis de nouveau vers 3 630 cm^{-1}, résulte d'une perturbation des groupes OH de constitution par les molécules d'eau de cristallisation qui restent sur l'argile.

Le tableau 4 résume les changements de fréquence successifs des vibrations des groupes OH de constitution de l'attapulgite, en fonction de la teneur en eau du minéral.

2. *Au niveau des groupements Si—O.*

L'évacuation de l'eau zéolitique entraîne de profondes modifications dans la région de vibration des groupes Si—O. On observe, en particulier, la disparition de la bande à 1 195 cm^{-1} et le développement d'une bande nouvelle à 1 143 cm^{-1} (fig. 8 A). Parallèlement l'élimination de l'eau zéolitique entraîne, comme l'a montré NATHAN (1969), une réduction du paramètre $a \sin\beta$ de la maille de l'ordre de 0,3 Å.

La modification réversible du paramètre $a \sin\beta$ avec l'état d'hydratation du minéral, entraîne certainement des variations de tension dans les liaisons Si—O—Si de jonction entre les lattes. Nous pensons, par conséquent, que la bande à 1 195 cm^{-1} est due à ces groupements. Cette attribution rejoint celle de MENDELOVICI (1973) qui attribue cette bande à des groupements Si—O.

c) *Étude de la structure et de l'arrangement des molécules d'eau présentes dans l'attapulgite pour chacun des états de l'eau identifiés par spectroscopie infrarouge.*

Les expériences présentées dans ce paragraphe ont été conduites pour déterminer des éléments de la structure de l'eau présente dans le minéral, dans les états successifs où elle se trouve au cours de la déshydratation. Elles consistent en la deutération progressive des échantillons maintenus à une teneur en eau constante. Nous présentons successivement la deutération progressive de l'attapulgite séchée à l'air, déshydratée par chauffage sous vide à 150°C et déshydratée par chauffage sous vide à 250°C.

1. *Étude de l'eau présente dans l'attapulgite hydratée. État I.*

Dans cette expérience nous avons étudié l'eau présente dans l'argile lorsque l'échantillon, traversé par le faisceau infrarouge, est mis en contact avec une pression de vapeur d'eau saturante. Les conditions expérimentales sont telles que le minéral contient environ 17 p. 100 d'eau par rapport à l'échantillon calciné. Cette teneur en eau, déterminée avec le montage de la figure 4 de l'annexe, est voisine de celle donnée par CAILLÈRE et HÉNIN (1961) pour un échantillon séché à l'air. Les canaux du minéral contiennent de l'eau zéolitique.

La figure 10 représente les spectres correspondant à la deutération progressive de l'attapulgite hydratée.

Le spectre des vibrations de déformation angulaire des molécules de H_2O découplées (spectres *d* de la fig. 10), est formé d'une bande large et dissymétrique située à 1 658 cm^{-1}.

Le spectre des vibrations de valence des groupes OD découplés (spectre *b* de la fig. 10) est formé, quant à lui, de deux bandes à 2 490 et 2 610 cm^{-1}. Il existe par conséquent deux types d'hydroxyles dans l'eau présente dans l'attapulgite. Les deutéroxyles correspondant à la bande à 2 490 cm^{-1} sont engagés dans des liaisons hydrogène, alors que ceux qui correspondent à la bande à 2 610 cm^{-1} ne le sont pas.

Enfin, le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD n'est pas simple. Il est formé d'un maximum apparent à 1 455 cm^{-1} et de deux épaulements à 1 420 et 1 475 cm^{-1}.

Le rétablissement des couplages intramoléculaires obtenu en changeant le taux de substitution de H par D ne modifie pas l'allure générale du spectre des vibrations de valence de l'eau. Il y a seulement un décalage des fréquences qui passent de 2 490 et 2 610 cm^{-1} sur le spectre OD de HOD (spectre *b* de la fig. 10), à 2 485 et 2 622 cm^{-1} sur le spectre de D_2O (spectre *e* de la fig. 10). L'augmentation de l'écart des fréquences entre les vibrations OD de HOD et les vibrations de valence de D_2O, ainsi que la position relative des bandes, sont dues aux couplages intramoléculaires qui existent entre les groupes OD de molécules de D_2O de symétrie C_s (BELLAMY et PACE, 1972).

L'application du tableau 2 permet de dénombrer les différents types de molécules d'eau, à partir des enregistrements obtenus pour des deutérations partielles des échantillons. Il y a 3 bandes de vibration de déformation angulaire de HOD, donc $n + m = 3$. Nous ne disposons pas d'autre équation pour calculer n et m.

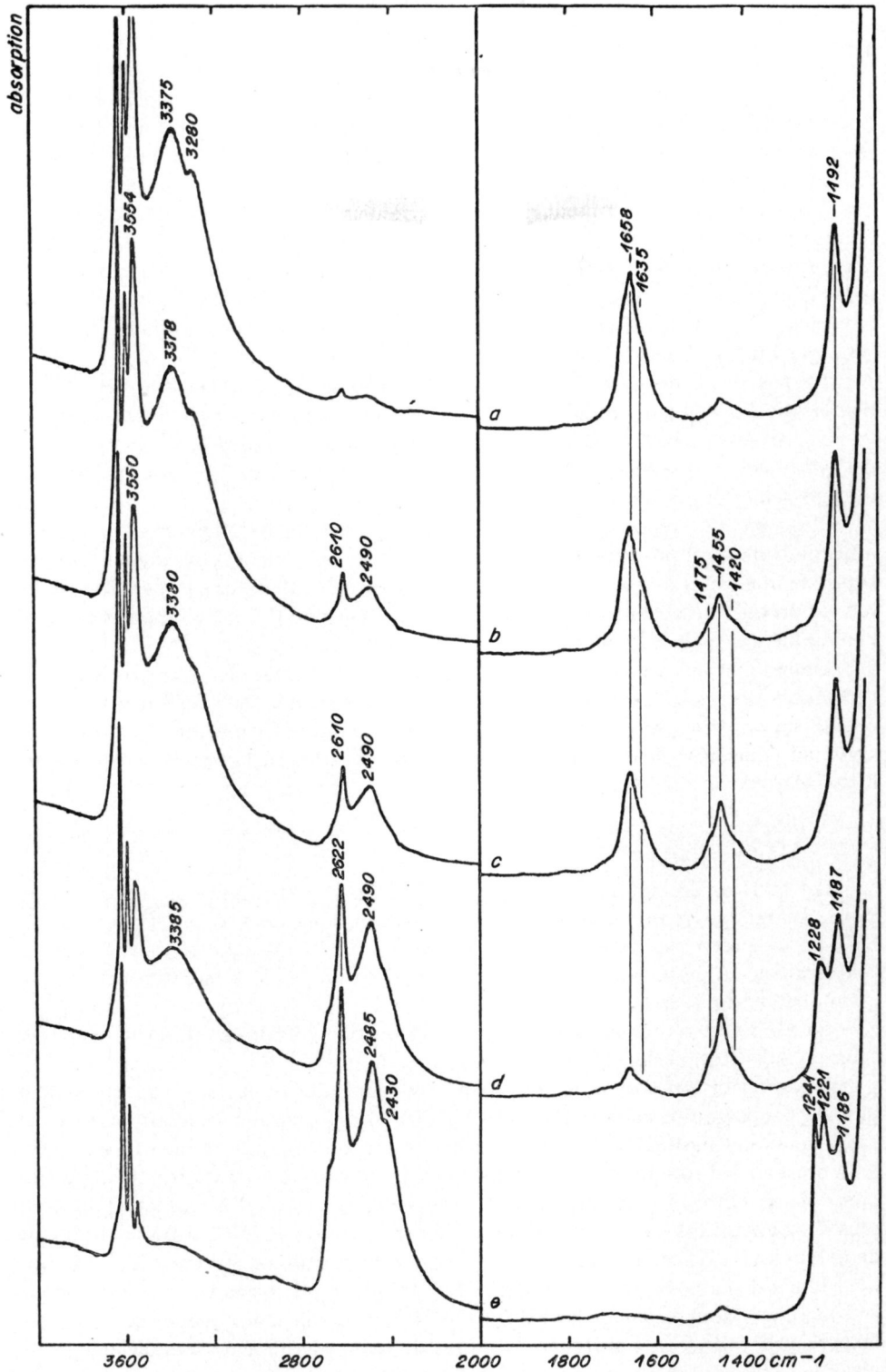


FIG. 10. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'eau présente dans l'attapulgite séchée à l'air*

Deux cas peuvent se produire : $m = 0$ ou $m = 1$. L'existence de molécules d'eau de symétrie C_s démontrée plus haut nous oblige à prendre $m = 1$ donc $n = 2$. On en conclut qu'il existe deux types de molécules d'eau dont un a la symétrie C_s et l'autre la symétrie C_{2v}.

Nous attribuons, par analogie avec les résultats obtenus pour la natrolite, la bande à 1 221 cm^{-1} et son homologue à 1 635 cm^{-1}, aux vibrations de déformation angulaire de molécules d'eau de symétrie C_s, et les bandes à 2 485 et 2 622 cm^{-1} et leurs homologues à 3 375 et 3 550 cm^{-1}, aux vibrations de valence de ces mêmes molécules d'eau de symétrie C_s. Ces molécules d'eau contractent des liaisons hydrogène par l'intermédiaire d'un seul de leurs hydroxyles.

La fréquence de vibration de déformation angulaire à 1 241 cm^{-1} et de son homologue à 1 658 cm^{-1} indique que les molécules d'eau correspondantes de symétrie C_{2v}, ont leurs deux hydroxyles engagés dans des liaisons hydrogène. Les fréquences de vibration de valence de ces molécules d'eau sont par conséquent proches de 2 485 cm^{-1} ou de son homologue à 3 375 cm^{-1}.

Tarasevich (1970, 1971), en s'appuyant sur d'autres éléments du spectre infrarouge de l'eau présente dans l'attapulgite, fut aussi amené à distinguer les deux types de molécules d'eau qui viennent d'être identifiés. Il n'est pas possible toutefois de préciser actuellement si les molécules de symétrie C_s ou C_{2v} appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation ou zéolitiques.

Dans l'état I les molécules d'eau présentes dans l'attapulgite appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau zéolitiques ou à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation. Une partie des molécules d'eau, sans qu'il soit possible de préciser s'il s'agit de molécules d'eau zéolitiques ou de cristallisation, a la symétrie C_{2v}, l'autre la symétrie C_s.

2. *Étude de l'eau présente dans l'attapulgite déshydratée par chauffage sous vide à 150°C. État II.*

Cet état correspond au cas où l'attapulgite a perdu la totalité de son eau zéolitique. L'argile contient, d'après les déterminations que nous avons faites avec la balance de quartz (fig. 4 de l'annexe), environ 12 p. 100 d'eau par rapport à l'échantillon calciné. A cette teneur en eau correspond en moyenne 2 molécules d'eau par cation octaédrique de bord.

La figure 11 représente les spectres d'absorption infrarouge de l'eau pour des taux de substitution de H par D croissants.

Les spectres *b* et *d* de la figure 11 correspondent au cas où il n'y a pratiquement plus de couplage intermoléculaire. Les bandes de déformation angulaire à 1 622 et 1 206 cm^{-1}, des molécules H_2O et D_2O découplées, sont uniques et bien résolues. On peut donc en déduire que la plupart des molécules d'eau sont identiques. Les spectres *a* et *e* de la figure 11 correspondent, quant à eux, au cas où il n'y a pratiquement plus de couplage inter et intramoléculaire. Le spectre OD de HOD est alors formé de deux bandes à 2 600 et 2 660 cm^{-1} et d'un petit épaulement à 2 695 cm^{-1}. Ceci indique l'existence de deux types d'hydroxyles. Les premiers qui correspondent à la bande à 2 600 cm^{-1}, sont engagés dans des liaisons hydrogène, alors que les seconds, qui absorbent à 2 660 cm^{-1}, ne contractent pas de liaison hydrogène. Parallèlement, on observe sur le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD deux bandes à 1 422 et 1 442 cm^{-1}.

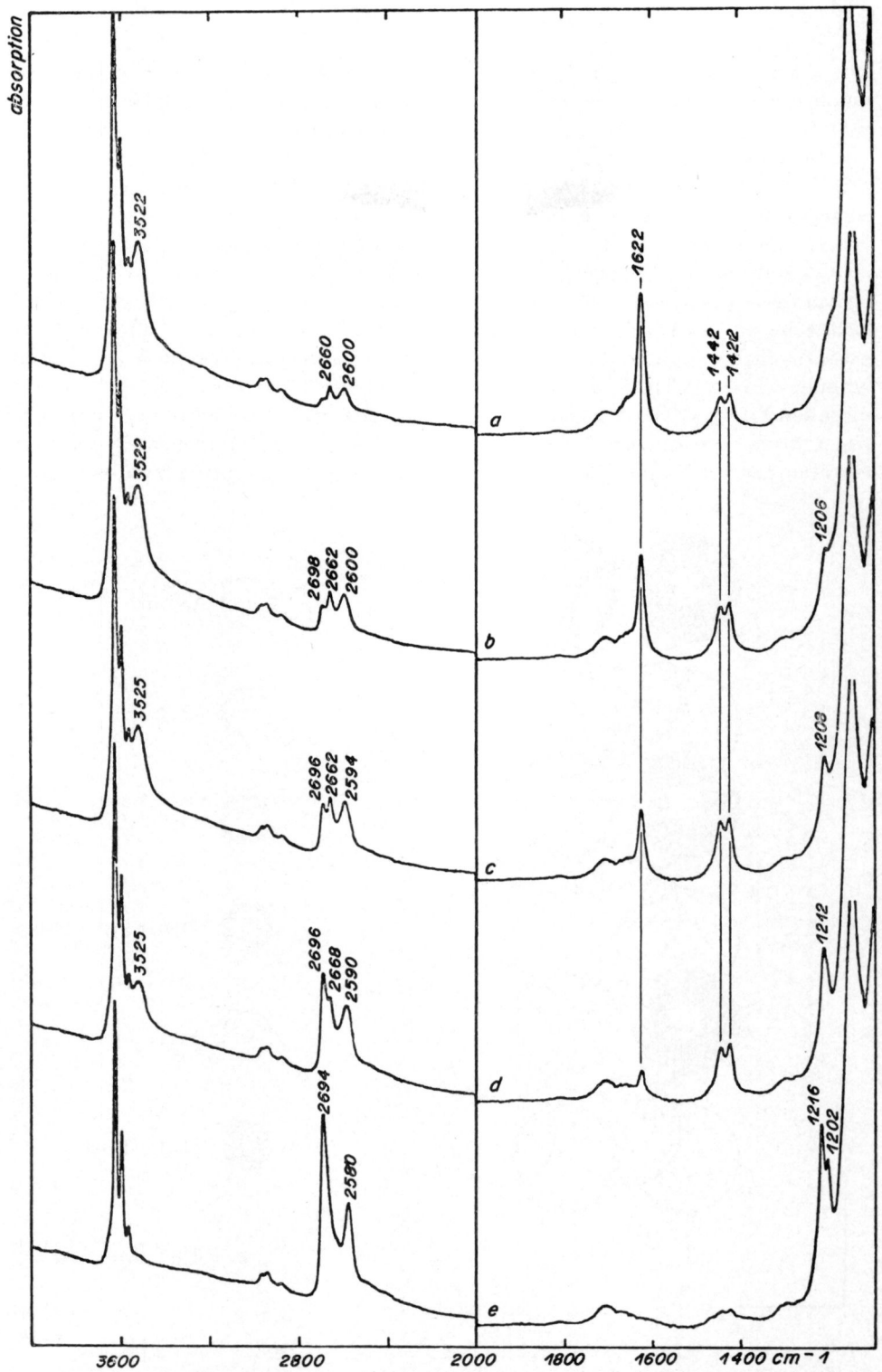


FIG. 11. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'eau de cristallisation de l'attapulgite*

L'application du tableau 2 donne $n = 1$ et $n + m = 2$. Il n'y a par conséquent qu'une seule catégorie de molécules d'eau dont la symétrie est C_s. Ces molécules d'eau contractent une liaison hydrogène par l'intermédiaire d'un seul de leurs hydroxyles.

Le léger déplacement en fréquence, lorsque le taux de D augmente, de 2 600 et 2 660 cm^{-1}, respectivement vers 2 580 et 2 694 cm^{-1}, est dû à un couplage résiduel entre les deux hydroxyles de la molécule d'eau (BELLAMY et PACE, 1972).

Les molécules d'eau de cristallisation qui restent sur l'argile ont par conséquent un de leurs hydroxyles engagé dans une liaison hydrogène. Les liaisons hydrogène peuvent être contractées entre les molécules d'eau elles-mêmes ou avec des atomes d'oxygène du réseau. Certains de ces atomes d'oxygène portent en effet un léger excès de charge négative qui résulte de la cassure du feuillet. L'application du diagramme de NAKAMOTO *et al.* (1955) à la vibration OH de HOD à 3 522 cm^{-1} ou à la vibration OD de HOD à 2 600 cm^{-1}, (pour utiliser cette fréquence on la multiplie par 1,36 qui est le rapport de deutération qu'on trouve habituellement pour les vibrations découplées de l'eau) qui correspond aux hydroxyles inclus dans des liaisons

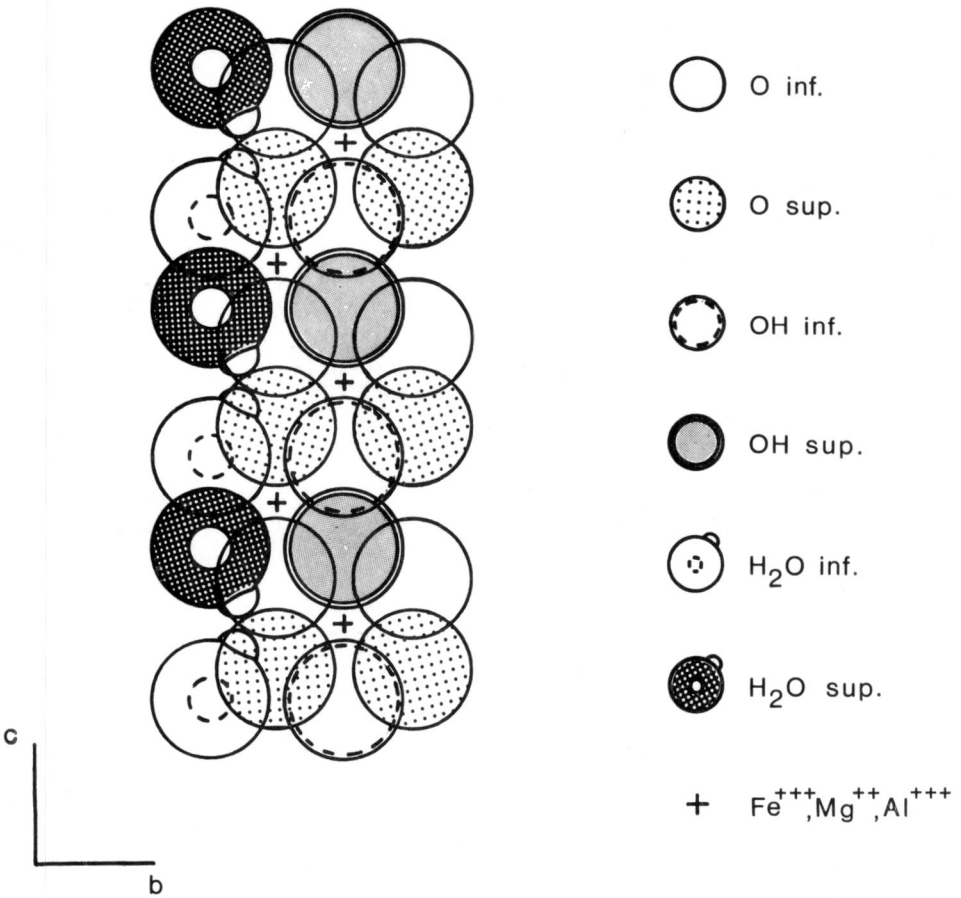


FIG. 12. — *Arrangement des molécules d'eau de cristallisation présentes dans l'attapulgite. Projection sur un plan parallèle à (b, c) d'une partie de la couche octaédrique d'une latte d'attapulgite*

hydrogène, donne une distance O—O de 2,94 Å. Si on se réfère aux modèles proposés par BRAUNER et PREISINGER (1956) et RAUTUREAU (1974), pour l'arrangement des molécules d'eau de cristallisation dans le plan (040) de la sépiolite (fig. 17) la distance de 2,94 Å est incompatible avec la formation de liaison hydrogène entre les molécules d'eau de cristallisation. Par contre, cette distance de 2,94 Å est voisine de la distance de 3 Å qui existe entre les atomes d'oxygène de la couche octaédrique et les atomes d'oxygène des molécules d'eau de cristallisation (PREISINGER, 1961). En conséquence, dans les conditions de déshydratation présentes, les molécules d'eau de cristallisation engageraient un de leur proton dans une liaison hydrogène avec un atome d'oxygène du réseau de l'argile. Les conditions géométriques sont favorables pour la formation d'une telle liaison (fig. 12).

Dans l'état II les molécules d'eau présentes dans l'attapulgite appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation. Elles ont la symétrie C_s, en raison de la formation d'une liaison hydrogène avec des atomes d'oxygène du réseau, par l'intermédiaire d'un seul de leurs hydroxyles.

3. *Étude de l'eau présente dans l'attapulgite déshydratée par chauffage sous vide à 250°C. État III.*

Cet état d'hydratation correspond au cas où l'attapulgite a perdu, en plus de son eau zéolitique, la moitié de son eau de cristallisation. D'après les déterminations qui ont été faites avec la balance de quartz (fig. 4 de l'annexe), il reste en moyenne une molécule d'eau par cation octaédrique de bord.

Pour réaliser cette expérience de deutération partielle nous avons dû utiliser un nouvel échantillon pour chacun des stades de la deutération. Pratiquement, nous avons préparé un film de grande surface, aussi homogène que possible, coupé ensuite en petits carrés de quelques cm^2. Chacun de ces carrés n'a permis d'obtenir qu'un seul enregistrement.

La figure 13 représente les spectres d'absorption infrarouge de l'eau pour des taux de substitution de H par D croissants. Les bandes de déformation angulaire à 1 622 et 1 198 cm^{-1} des molécules H_2O et D_2O découplées (spectre *c* de la fig. 13), sont uniques et bien résolues. Toutes les molécules d'eau sont donc identiques. Le spectre OD de HOD (spectre *b* de la fig. 13) est formé d'une bande principale à 2 626 cm^{-1} flanquée de deux petites bandes satellites à 2 585 et 2 670 cm^{-1}. Tous les hydroxyles sont par conséquent identiques. Enfin, il n'y a qu'une bande de déformation angulaire de HOD à 1 430 cm^{-1}.

L'application du tableau 2, donne $n + m = 1$ et $n = 1$. En conséquence toutes les molécules d'eau sont identiques et ont la symétrie C_{2v}.

Le développement des bandes à 2 585 et 2 670 cm^{-1} et la diminution concomitante de la bande à 2 626 cm^{-1}, quand le taux de D augmente (spectres *b*, *c* et *d* de la fig. 13), est la conséquence du rétablissement des couplages intramoléculaires entre les deux hydroxyles des molécules d'eau. Les résultats rapportés par SAUMAGNE et JOSIEN (1958) pour l'eau présente dans différents solvants, par FIFER et SCHIFFER (1971), pour l'eau de cristallisation dans les sels ou par FISHMAN et SAUMAGNE (1965) dans le cas de l'eau liquide, indiquent que la bande de vibration de valence antisymétrique de l'eau est celle qui a la fréquence la plus élevée. Par conséquent les bandes à 1 198, 2 585 et 2 670 cm^{-1} correspondent respectivement aux vibrations de

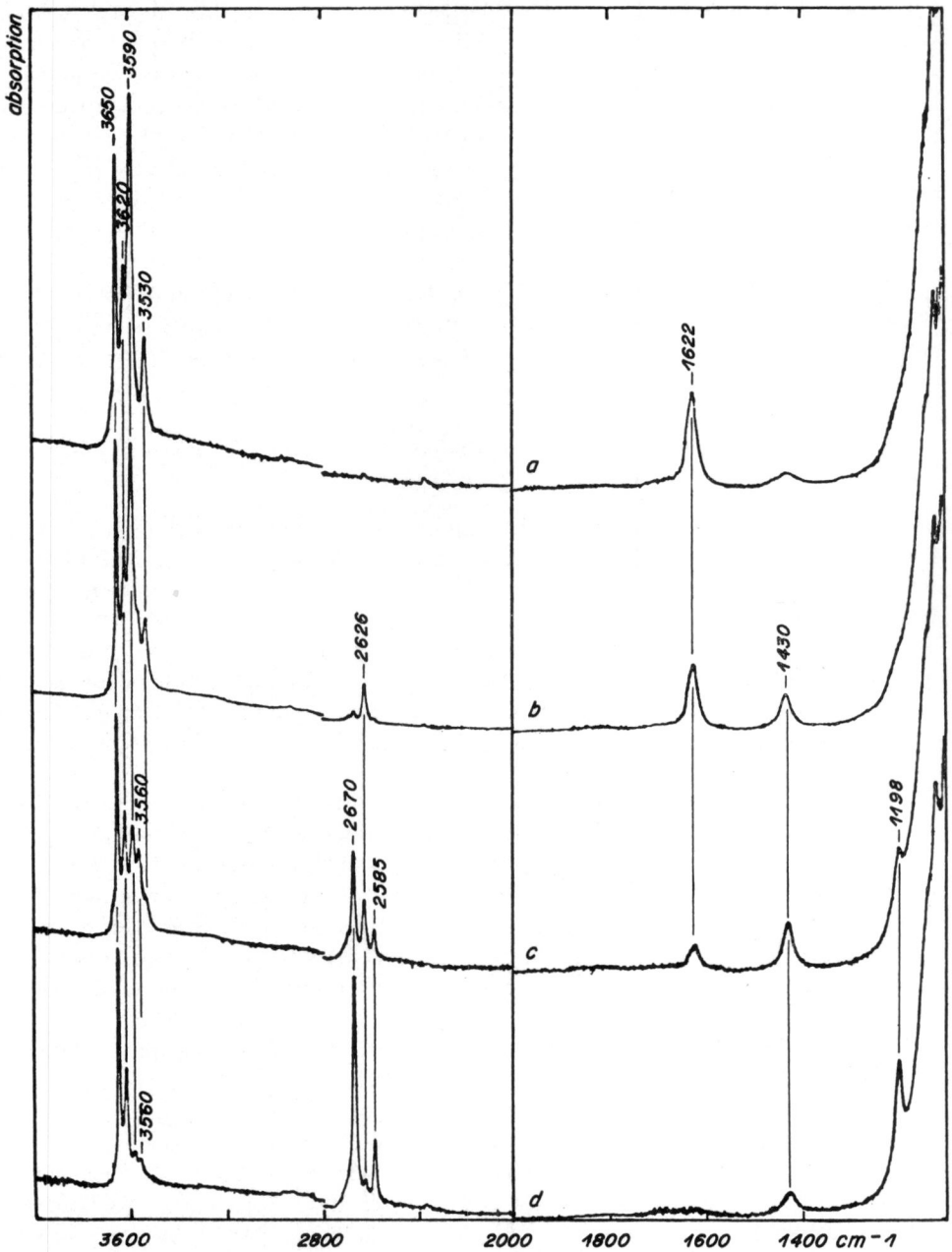


FIG. 13. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c* et *d*) *de l'eau de cristallisation présente dans l'attapulgite chauffée sous vide à 250°C provoquant le basculement des lattes du minéral*

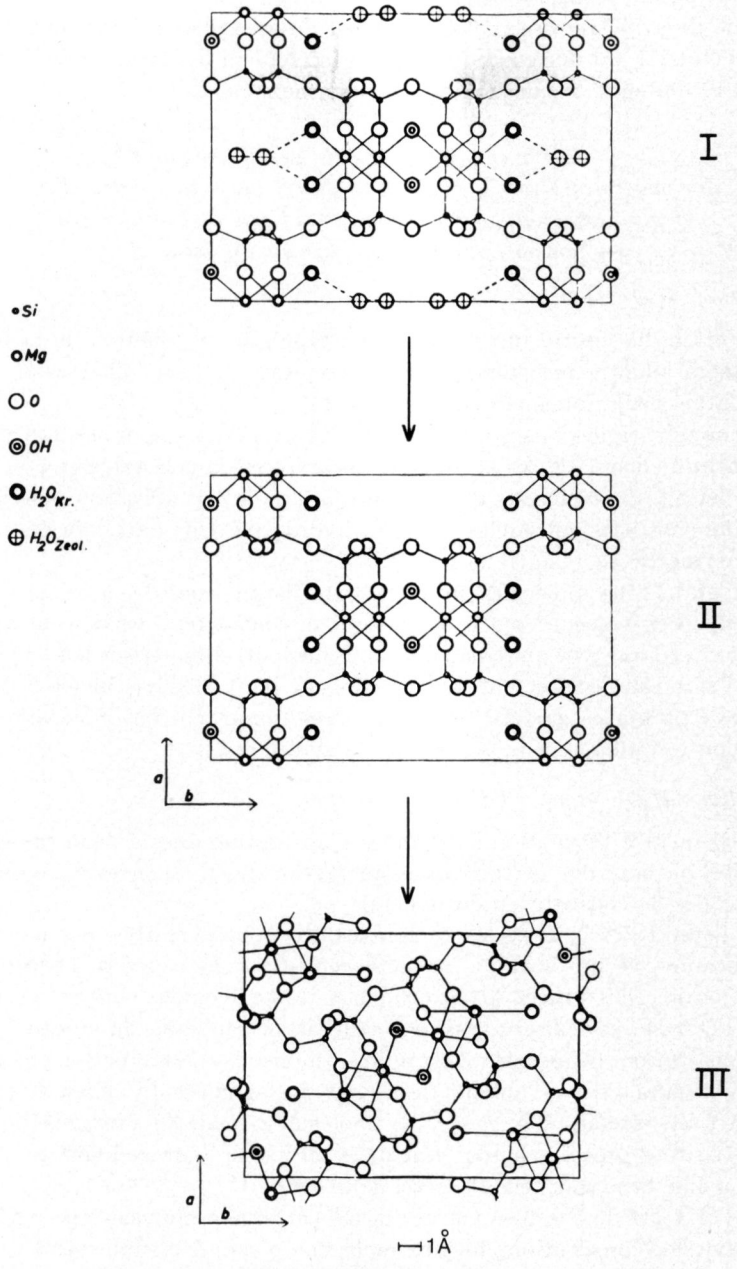


FIG. 14. — *Représentation schématique des états de l'eau présente dans l'attapulgite en fonction de la teneur en eau du minéral*

déformation angulaire, de valence symétrique et antisymétrique de la molécule d'eau.

Dans l'état III, les molécules d'eau présentes dans l'attapulgite appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation. Elles ont la symétrie C_{2v}. Le changement de symétrie des molécules d'eau de cristallisation lorsqu'on passe de l'état II à l'état III, est une conséquence du basculement des lattes et de l'éclatement des octaèdres de bord, ce qui modifie leur environnement.

3. — *Conclusion de l'étude des interactions des molécules d'eau zéolitiques et de cristallisation entre elles et avec les groupes hydroxyles du réseau de l'attapulgite en fonction de la teneur en eau du minéral*

a) *Interactions H_2O—H_2O.*

L'évolution du spectre infrarouge de l'attapulgite en fonction de la teneur en eau du minéral montre l'existence de plusieurs états de l'eau. Chacun de ces états est représenté schématiquement sur la figure 14.

Les caractéristiques spectroscopiques et structurales des molécules d'eau qui appartiennent à chacun de ces états, sont rassemblées dans le tableau 4.

Dans l'état I, les molécules d'eau zéolitiques et de cristallisation présentes dans l'attapulgite, sont liées entre elles par pont hydrogène. Une partie de ces molécules d'eau a la symétrie C_{2v}, l'autre la symétrie C_s.

Dans l'état II, les molécules qui restent sur l'argile sont des molécules d'eau de cristallisation. Ces molécules ont la symétrie C_s et contractent des liaisons hydrogène avec des atomes d'oxygène du réseau par l'intermédiaire d'un seul de leurs hydroxyles.

Dans l'état III, l'éclatement des octaèdres de bord et le basculement des lattes, entraînent de profondes modifications dans l'environnement des molécules d'eau de cristallisation restantes. Ces molécules ont la symétrie C_{2v}.

b) *Interactions H_2O—groupes OH de constitution.*

Parallèlement à l'évolution des bandes d'absorption dues à l'eau présente dans l'attapulgite, on note des perturbations au niveau des fréquences des bandes dues aux hydroxyles de constitution du minéral.

Dans l'état I, les hydroxyles de constitution sont perturbés par les molécules d'eau zéolitiques, ce qui entraîne un déplacement de la bande à 3 630 cm^{-1} vers 3 620 cm^{-1} et de celles situées 862 et 930 cm^{-1}, respectivement vers 872 et 940 cm^{-1}.

Dans l'état II, on n'observe pas de perturbation semblable au niveau des hydroxyles de constitution. D'une part, il n'y a plus, en raison de l'élimination de l'eau zéolitique, de molécules d'eau à l'aplomb des cavités hexagonales du milieu du feuillet et, d'autre part, les atomes d'oxygène des molécules d'eau de cristallisation et des groupes OH situés près des bords, sont dans un même plan excluant toute perturbation du même type que celle observée pour l'état I.

Dans l'état III, le basculement des lattes entraîne à nouveau une perturbation des hydroxyles de constitution, due aux molécules d'eau de cristallisation qui restent sur l'attapulgite. En effet, le basculement des lattes amène les molécules d'eau de cristallisation à l'aplomb des cavités hexagonales des lattes voisines (fig. 14). Dans la mesure où tous les hydroxyles situés à l'intérieur des feuillets sont perturbés (spectre *b* de la fig. 8 B et spectre *d* de la fig. 13) il faut admettre que les lattes ont effecti-

vement la largeur indiquée par le modèle de BRADLEY (1940) ou de PREISINGER (1961) car il ne peut pas y avoir plus de deux hydroxyles de constitution perturbés, par demi-maille. Ceci nous amène à rejeter l'association de lattes de largeur différentes proposée par GARD et FOLLETT (1968) (fig. 7). La figure 15 donne la représentation schématique idéalisée que nous proposons pour l'attapulgite. Le même problème apparaît dans le cas de la sépiolite qui est abordé dans le paragraphe suivant. Cet exemple illustre la contribution possible de l'étude des interactions eau-argile à la connaissance de la structure du réseau du minéral.

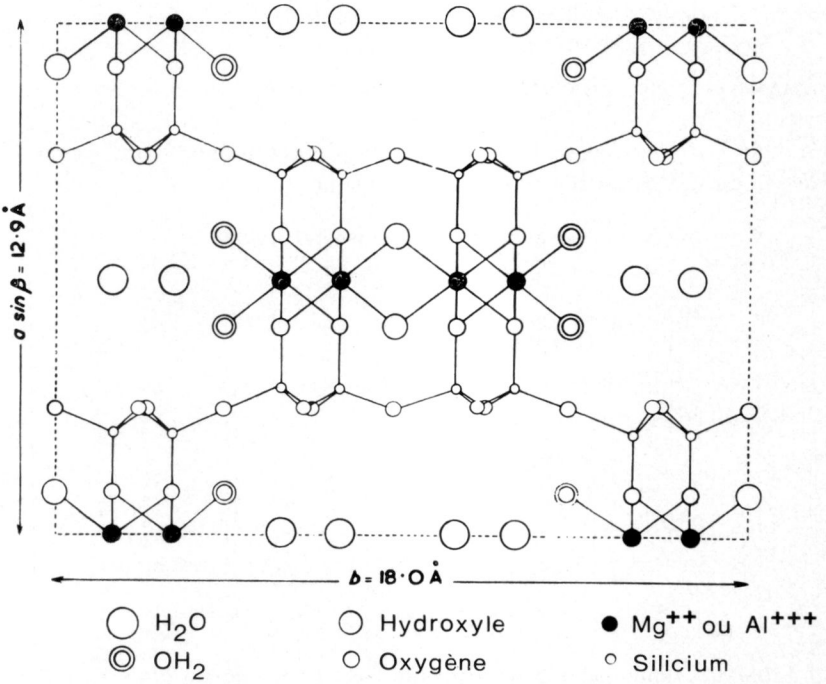


FIG. 15. — *Structure de l'attapulgite : projection sur le plan* (001)

C. — LA SÉPIOLITE

1. — *Propriétés physico-chimiques du minéral*

L'échantillon de sépiolite que nous avons étudié est de Vallecas (Espagne). Il nous a été fourni par le Pr SERRATOSA du Consejo Superior de Investigaciones Cientificas de Madrid.

Morphologie.

L'étude morphologique de la sépiolite par microscopie électronique (RAUTUREAU et TCHOUBAR, 1972) montre que cette argile est composée par l'association de fibrilles élémentaires ayant leur axe d'allongement parallèle à une même direction. Ces fibrilles élémentaires, sans texture apparente, sont monocristallines et leur section droite est souvent de l'ordre de 150 × 300 Å, tandis que leur longueur est de l'ordre de quelques micromètres.

Composition chimique.

La formule chimique de ce minéral a été publiée par SERNA (1973).

$$[Si^{++++}_{11,92}\ Al^{+++}_{0,08}]\ [Mg^{++}_{6,98}\ Fe^{++}_{0,08}\ Al^{+++}_{0,54}\ Fe^{+++}_{0,02}]\ [OH^{-}_{4}]\ [(H_2O)_4]\ [O^{--}_{30}]\ [K^{+}_{0,16}\ NA^{+}_{0,12}]$$

Analyse thermopondérale.

Comme pour l'attapulgite l'analyse thermopondérale met bien en évidence l'existence de plusieurs états pour l'eau présente dans la sépiolite. On distingue :

— l'eau zéolitique qui occupe la partie centrale des canaux,
— l'eau de cristallisation,
— l'eau de constitution du minéral,

(LONGCHAMBON, 1937 ; IMAI *et al.*, 1969 ; SERNA, 1973 ; RAUTUREAU et CAILLÈRE, 1974 ; etc.).

La figure 16 représente la courbe d'analyse thermopondérale de la sépiolite débarrassée du $CaCO_3$ qu'elle contient naturellement.

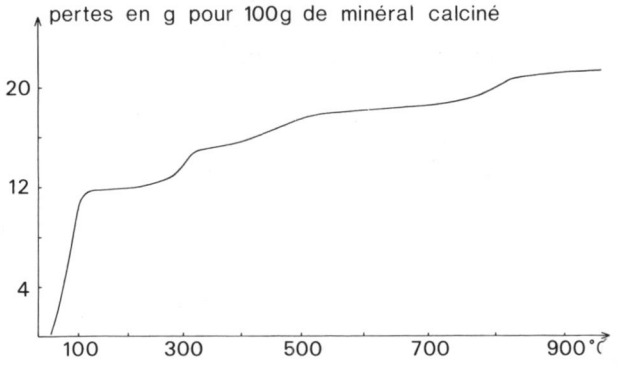


FIG. 16. — *Courbe d'analyse thermopondérale de la sépiolite*

Le tableau 5 donne les températures de départ de chacun des types d'eau et les pourcentages respectifs. Nous y avons aussi fait figurer les valeurs calculées à partir de la formule. Le bon accord observé justifie le choix de la formule.

TABLEAU 5

Résultats de l'analyse thermopondérale de la sépiolite de Vallecas traitée afin d'éliminer le $CaCO_3$

	Température de départ en °C	Pertes exprimées en p. 100 de l'échantillon calciné	Pertes calculées à partir de la formule, exprimées en p. 100 de l'échantillon calciné
H_2O zéolitique	< 200	11,8	
H_2O de cristallisation	200-350	3,4	6,87
	350-600	3	
OH de constitution	> 600	3	3,43

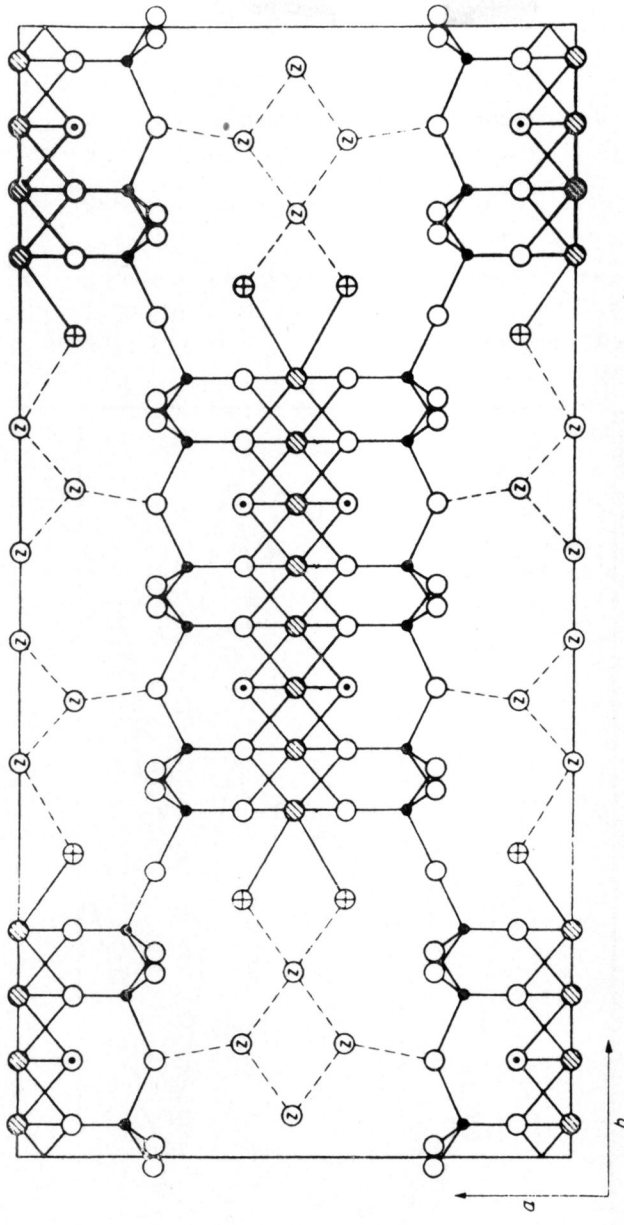


FIG. 17. — *Structure de la sépiolite selon* BRAUNER *et* PREISINGER (1956) : *projection sur le plan* (001)

Structure.

Les premières analyses structurales de la sépiolite ont été effectuées par NAGY et BRADLEY (1955) et BRAUNER et PREISINGER (1956). La figure 17 représente le modèle proposé par ces derniers auteurs. Le monocristal est constitué de rubans disposés en quinconce. Chaque ruban est une portion de feuillet 2 : 1 trioctaédrique de type talc.

2. — *Identification et étude par spectroscopie infrarouge des états de l'eau au cours de la déshydratation du minéral*

a) *Évolution du spectre d'absorption infrarouge de l'eau présente dans la sépiolite en fonction de la teneur en eau du minéral.*

L'expérience a été réalisée à l'aide du montage représenté par la figure 4 de l'annexe. Ce dispositif est équipé d'une balance de quartz qui permet la pesée de l'échantillon au cours même de l'enregistrement. L'argile se présente sous la forme d'un film autoporteur.

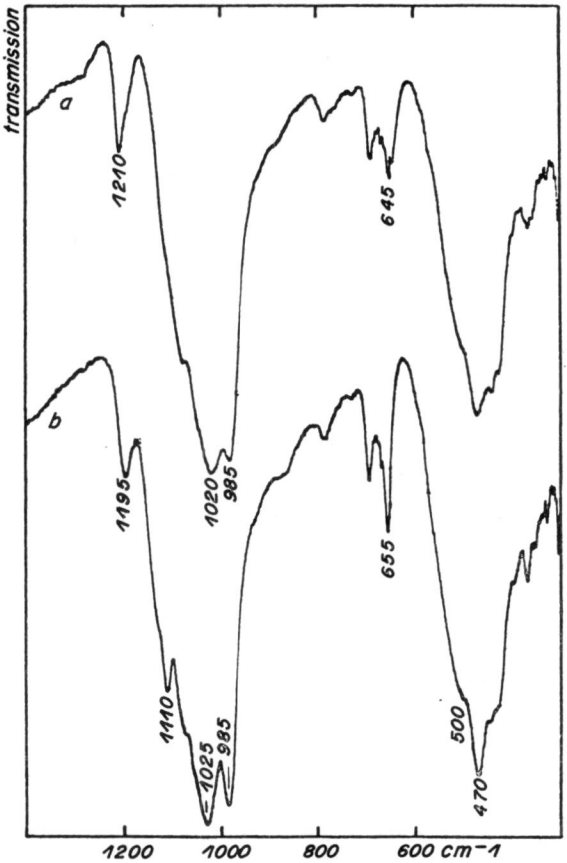


FIG. 18 A. — *Spectre infrarouge de la sépiolite*
a : séchée à l'air
b : déshydratée par mise sous vide

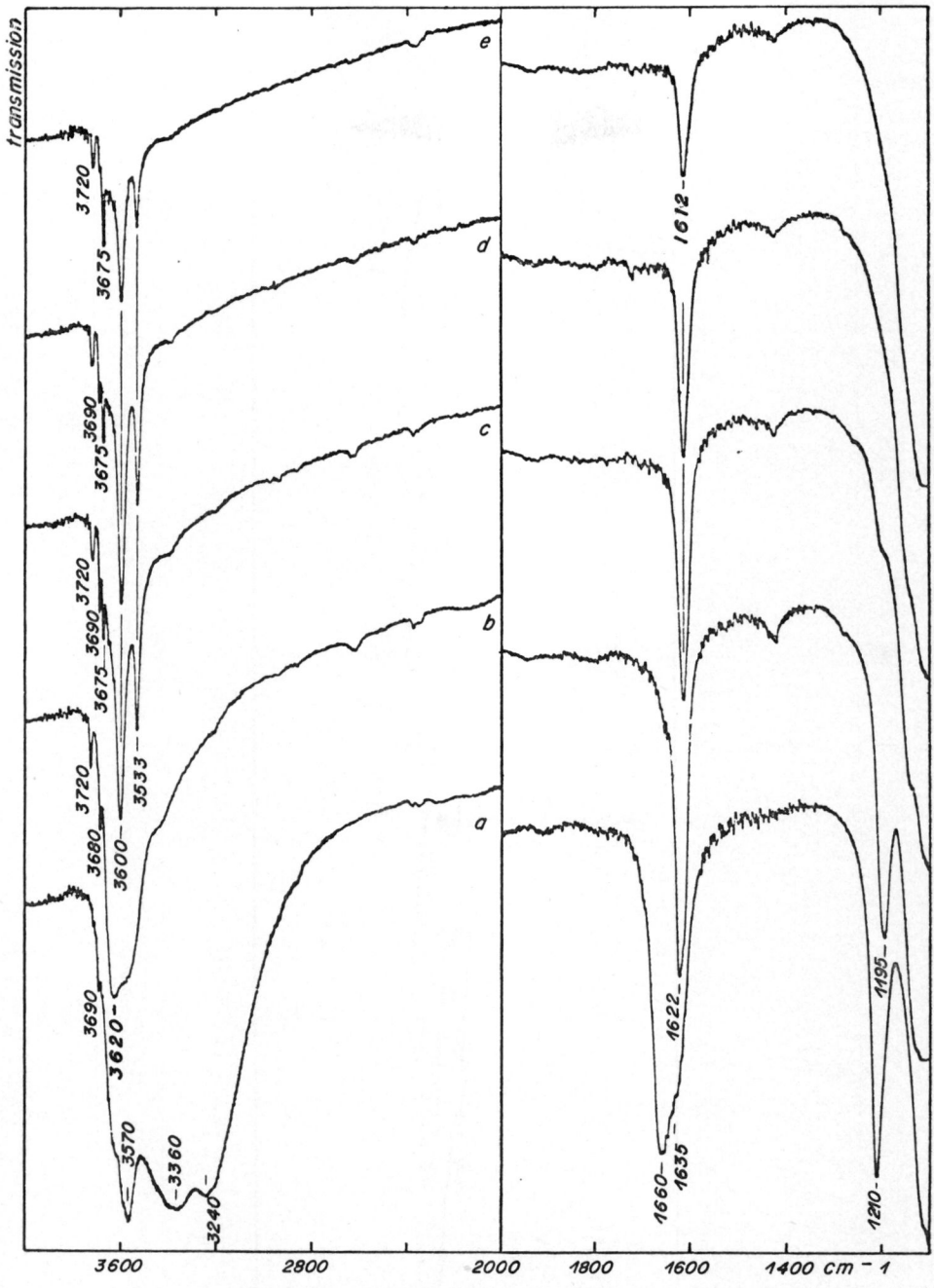


FIG. 18 B. — *Spectre infrarouge de la sépiolite pour des teneurs en eau décroissantes*

a : argile séchée à l'air contenant 24 p. 100 d'eau.
b : argile déshydratée par mise sous vide contenant 13 p. 100 d'eau
c, *d* et *e* : argile contenant respectivement 10, 7 et 6 p. 100 d'eau

Le détail du spectre de vibration
de valence des hydroxyles de constitution est représenté sur la fig. 18 C

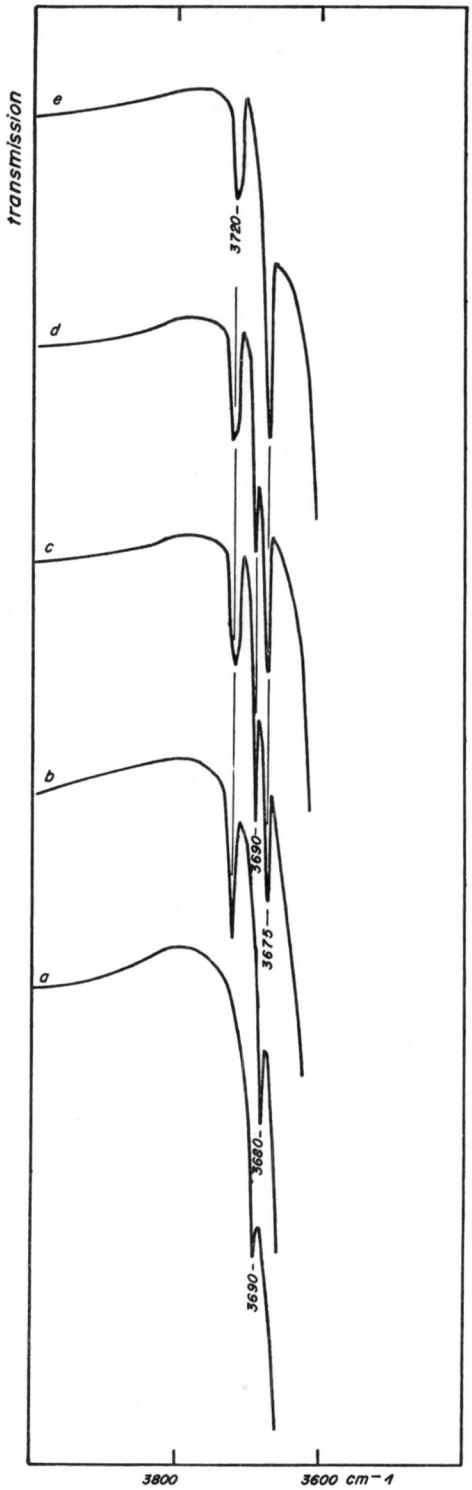


FIG. 18 C. — *Détails de l'évolution du spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de la sépiolite*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* correspondent à ceux de la figure 18 B

La meilleure résolution des systèmes deutérés par rapport aux systèmes qui ne le sont pas, nous a conduit à faire l'expérience dans les deux cas. Les enregistrements sont rassemblés sur la figure 18 B pour les systèmes non deutérés et sur la figure 19 pour les systèmes deutérés.

1. *Déshydratation par mise sous vide et par chauffage sous vide à une température voisine de 150°C.*

L'élimination d'une partie de l'eau par mise sous vide de l'échantillon (spectre *b* de la fig. 18 B) entraîne la diminution simultanée de la bande de déformation angulaire de H_2O à 1 660 cm^{-1} et des bandes de vibration de valence de H_2O à 3 240-3 360 cm^{-1} et à 3 570 cm^{-1}. Parallèlement, on observe une augmentation de la densité optique à 1 622 et 3 620 cm^{-1}. Ces résultats ont déjà fait l'objet de publications (PROST, 1973 *a* SERNA, 1973).

L'examen des résultats obtenus lorsque l'eau a été préalablement deutérée indique que la déshydratation par mise sous vide (spectre *d* de la fig. 19) ne conduit pas à l'élimination complète de la bande à 2 635 cm^{-1}, et qu'il reste une absorption résiduelle importante à 2 490 cm^{-1}. Comme pour l'attapulgite, la mise sous vide de l'échantillon ne suffit pas pour éliminer la totalité de l'eau zéolitique. Ce résultat est tout à fait en accord avec la courbe d'analyse thermopondérale qui montre l'élimination de la totalité de l'eau zéolitique quand l'échantillon a été chauffé à une température voisine de 200°C. Cette analyse n'implique pas que la bande à 2 635 cm^{-1} soit une bande de l'eau zéolitique mais seulement que son existence est liée à la présence de quelques molécules d'eau zéolitiques. On peut imaginer en effet que les dernières molécules d'eau zéolitiques restantes sont liées aux molécules d'eau de cristallisation suivant le schéma

$$Mg^{++} \cdots\cdots O\begin{matrix}H_a\\|\\—H_b\end{matrix} \cdots\cdots O\begin{matrix}H'_a\\|\\—H'_b\end{matrix}$$

Dans l'éventualité où la bande à 2 635 cm^{-1} est due aux groupes OH_a des molécules d'eau de cristallisation qui ne contractent pas de liaison hydrogène, elle disparaîtra du spectre seulement après l'élimination des molécules d'eau zéolitiques $O\begin{matrix}H'_a\\|\\—H'_b\end{matrix}$

Il faut chauffer le film de sépiolite à 150°C, sous vide, pour que la bande à 2 635 cm^{-1} soit presque totalement éliminée (spectre *e* de la fig. 19). Au fur et à mesure que l'intensité de la bande à 2 635 cm^{-1} diminue, on note le développement des bandes à 2 589 et 2 674 cm^{-1} et la diminution concomitante des bandes à 2 580 et 2 690 cm^{-1}, qui se sont développées au moment de la mise sous vide de l'échantillon. Les bandes à 2 589 et 2 674 cm^{-1} sont dues aux molécules d'eau de cristallisation.

La mauvaise résolution du spectre OH de l'eau présente dans la sépiolite déshydratée par mise sous vide (spectre *b* de la fig. 18 B) ne permet pas l'individualisation des bandes de vibration de valence des molécules d'eau zéolitiques et de cristallisation. On peut cependant conclure, grâce aux expériences effectuées sur les systèmes deutérés, que l'eau présente dans la sépiolite déshydratée par mise sous vide comprend les molécules d'eau de cristallisation et quelques molécules d'eau zéolitiques. Chacune

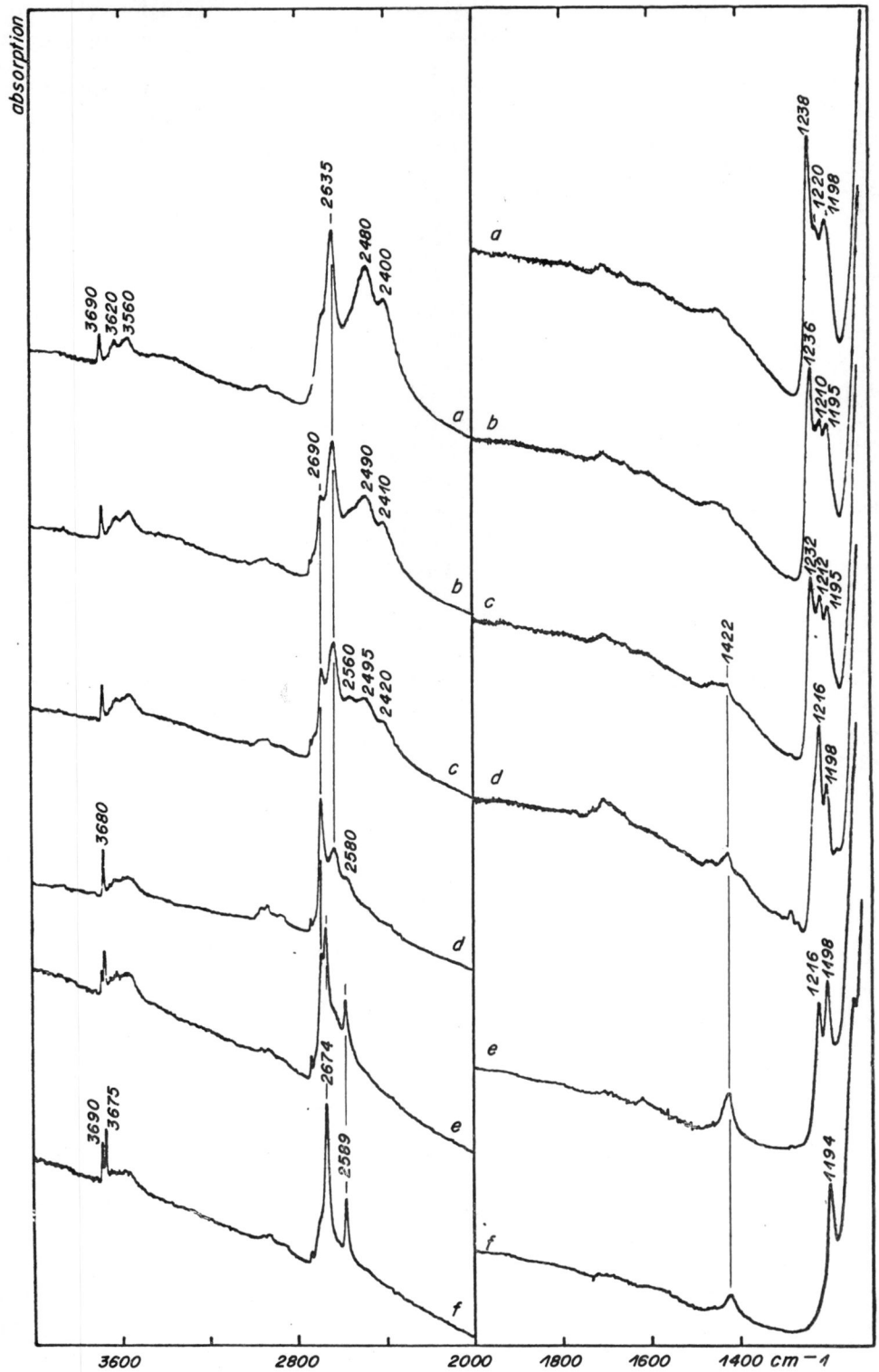


FIG. 19. — *Spectre infrarouge de la sépiolite pour des teneurs en D_2O décroissantes* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*)

de ces catégories de molécules d'eau donne un spectre d'absorption infrarouge caractéristique.

La courbe d'analyse thermopondérale ne permet pas de prévoir l'existence d'un état particulier pour les molécules d'eau qui restent dans la sépiolite déshydratée par mise sous vide.

Comme pour l'attapulgite, l'élimination d'une fraction de l'eau zéolitique entraîne la disparition des bandes à 1 660 cm^{-1} et à 3 240-3 360, 3 570 cm^{-1} en même temps que le développement d'une bande intense à 1 622 cm^{-1} et une augmentation de l'absorption à 3 620 cm^{-1}. Les valeurs des fréquences des vibrations de valence et de déformation indiquent (chap. I, A, 2) que les molécules d'eau restantes contractent des liaisons hydrogène faibles ou par le biais d'un seul de leurs hydroxyles. L'évolution générale du spectre de l'eau présente dans la sépiolite et, en particulier, le développement important de l'absorption à 1 622 cm^{-1}, quand on déshydrate le minéral, montrent que les molécules d'eau qui restent sur l'argile déshydratée par mise sous vide, contractent, sur les systèmes hydratés, des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau zéolitiques.

2. *Déshydratation par chauffage sous vide à 250°C.*

Lorsque la sépiolite est déshydratée par chauffage sous vide à une température voisine de 250°C, il y a élimination de la totalité de l'eau zéolitique et de la moitié de l'eau de cristallisation (SERNA, 1973). Ce traitement thermique entraîne aussi le basculement des lattes (PREISINGER, 1961 ; SERNA, 1973). Le spectre d'absorption du minéral est profondément modifié. Il apparaît dans la région des vibrations de valence de H_2O deux bandes à 3 533 et 3 600 cm^{-1} et, dans la région de vibration de déformation angulaire, une bande à 1 612 cm^{-1} (spectre *c* de la fig. 18 B). Ces résultats ont déjà fait l'objet de publications (CANNINGS, 1968 ; PROST, 1973 *a* ; SERNA, 1973).

Les expériences que nous avons effectuées sur les systèmes deutérés indiquent que les homologues des bandes signalées plus haut sont respectivement à 2 589, 2 674 et 1 194 cm^{-1} (spectre *f* de la fig. 19).

L'étude de l'évolution des spectres de l'eau deutérée et non deutérée, en fonction de l'état d'hydratation du minéral, montre que l'eau se présente sous trois états différents. Le tableau 6 précise les conditions de déshydratation correspondant à chacun des états et, respectivement, les caractéristiques spectroscopiques des molécules d'eau.

b) *Évolution du spectre d'absorption infrarouge du réseau de la sépiolite en fonction de la teneur en eau du minéral.*

1. *Au niveau des groupes OH de constitution de l'argile.*

L'élimination de l'eau zéolitique entraîne des modifications dans les fréquences de vibration des hydroxyles de constitution du minéral. C'est ainsi que les bandes de vibration de valence et de déformation de ces groupes OH, situées à 3 690 et 645 cm^{-1}, se déplacent respectivement vers 3 680 et 655 cm^{-1} (fig. 18 A et B). On remarque que les déplacements de fréquence se font dans le sens opposé de ceux observés pour l'attapulgite.

Le chauffage sous vide à 250°C provoque, quant à lui, de nouvelles modifications au niveau de la bande de vibration de valence des groupes OH de constitution du

TABLEAU 6

Tableau récapitulatif des états de l'eau dans la sépiolite (1)

État de l'eau	Conditions de déshydratation	Fréquence de vibration des molécules d'eau en cm^{-1}				Nature et symétrie des molécules d'eau	Fréquence de vibration de valence des groupes OH de constitution en cm^{-1}		Origine de la perturbation des groupes OH de constitution
		vibrations OH		vibrations OD					
		déformation	valence	déformation	valence		déformation	valence	
I	séchée à l'air	1 660 1 635 (épaulement)	3 240 3 360 3 570	1 238 1 220 (épaulement)	2 400 2 480 2 635	zéolitiques et de cristallisation (C_{2v} et C_s)	645	3 690	molécules d'eau zéolitiques
II	sous vide	1 622	3 570 3 620	1 216	2 580 2 635 2 690	quelques molécules d'eau zéolitiques (C_{2v}) + cristallisation (C_s)	655	3 680	....
III	chauffage sous vide à 250°C (basculement des lattes)	1 612	3 533 3 600	1 194	2 589 2 674	cristallisation (C_s)		3 675 3 690	molécules d'eau de cristallisation

(1) Ce tableau rassemble aussi des données discutées dans le paragraphe suivant.

minéral. Cette bande se dédouble pour donner deux bandes à 3 690 et 3 675 cm^{-1}, d'intensité à peu près égale (spectre *f* de la fig. 19, spectre *c* de la fig. 18 C). Au fur et à mesure de l'élimination des dernières molécules d'eau de cristallisation, la bande à 3 690 cm^{-1} diminue au profit de la bande à 3 675 cm^{-1} (spectres *d* et *e* de la fig. 18 B et de la fig. 18 C). En conséquence, la moitié environ des hydroxyles de constitution du minéral sont perturbés par l'eau de cristallisation qui reste dans la sépiolite après chauffage sous vide de l'échantillon à 250°C.

Le tableau 6 résume les changements de fréquence successifs des vibrations des groupes OH de constitution de la sépiolite, en fonction de la teneur en eau du minéral.

2. *Au niveau des groupements Si—O.*

L'évacuation de l'eau zéolitique entraîne de profondes modifications dans la région de vibration des groupes Si—O (fig. 18 A). On observe, en particulier, sur le spectre de l'échantillon déshydraté par mise sous vide, une forte diminution de l'intensité de la bande à 1 210 cm^{-1}, qui permet la résolution d'une bande à 1 195 cm^{-1}, et le développement concomitant d'une bande à 1 110 cm^{-1}. La bande à 1 195 cm^{-1} disparaît seulement quand toute l'eau zéolitique a été éliminée. Comme dans le cas de l'attapulgite, nous attribuons cette bande aux vibrations des groupements Si—O—Si qui assurent la jonction des lattes. Il y a, comme pour l'attapulgite, de légères modifications dans l'arrangement des lattes suivant que le minéral est hydraté ou débarrassé de son eau zéolitique (RAUTUREAU, 1974).

c) *Étude de la structure et de l'arrangement des molécules d'eau présentes dans la sépiolite pour chacun des états de l'eau identifiés par spectroscopie infrarouge.*

Les expériences présentées dans ce paragraphe ont été conduites pour déterminer des éléments de la structure de l'eau présente dans le minéral, selon les états successifs où elle se trouve au cours de la déshydratation. Elles consistent en la deutération progressive des échantillons maintenus à une teneur en eau constante. Nous présentons successivement la deutération progressive de la sépiolite séchée à l'air, déshydratée par mise sous vide et déshydratée par chauffage sous vide à 250°C.

1. *Étude de l'eau présente dans la sépiolite hydratée. État I.*

Les conditions expérimentales sont les mêmes que pour l'attapulgite. L'échantillon contient environ 20 p. 100 d'eau par rapport à l'échantillon calciné. Cette teneur en eau est voisine de celle donnée par CAILLÈRE et HÉNIN (1961) pour un échantillon séché à l'air. Les canaux du minéral contiennent de l'eau zéolitique.

La figure 20 représente les spectres correspondant à la deutération progressive de la sépiolite hydratée.

Le spectre des vibrations de déformation angulaire des molécules de H_2O découplées (spectres *d* de la fig. 20) est formé d'une bande large et dissymétrique dont le maximum est situé à 1 655 cm^{-1}.

Le spectre des vibrations de valence des groupes OD découplés (spectres *b* et *c* de la fig. 20) est formé, quant à lui, de deux bandes à 2 495 et 2 628 cm^{-1}. Il y a par conséquent deux types d'hydroxyles dans l'eau présente dans la sépiolite. Les deutéroxyles, qui correspondent à la bande à 2 495 cm^{-1}, sont engagés dans des liaisons hydrogène. Les autres, qui donnent la bande à 2 628 cm^{-1}, ne le sont pas.

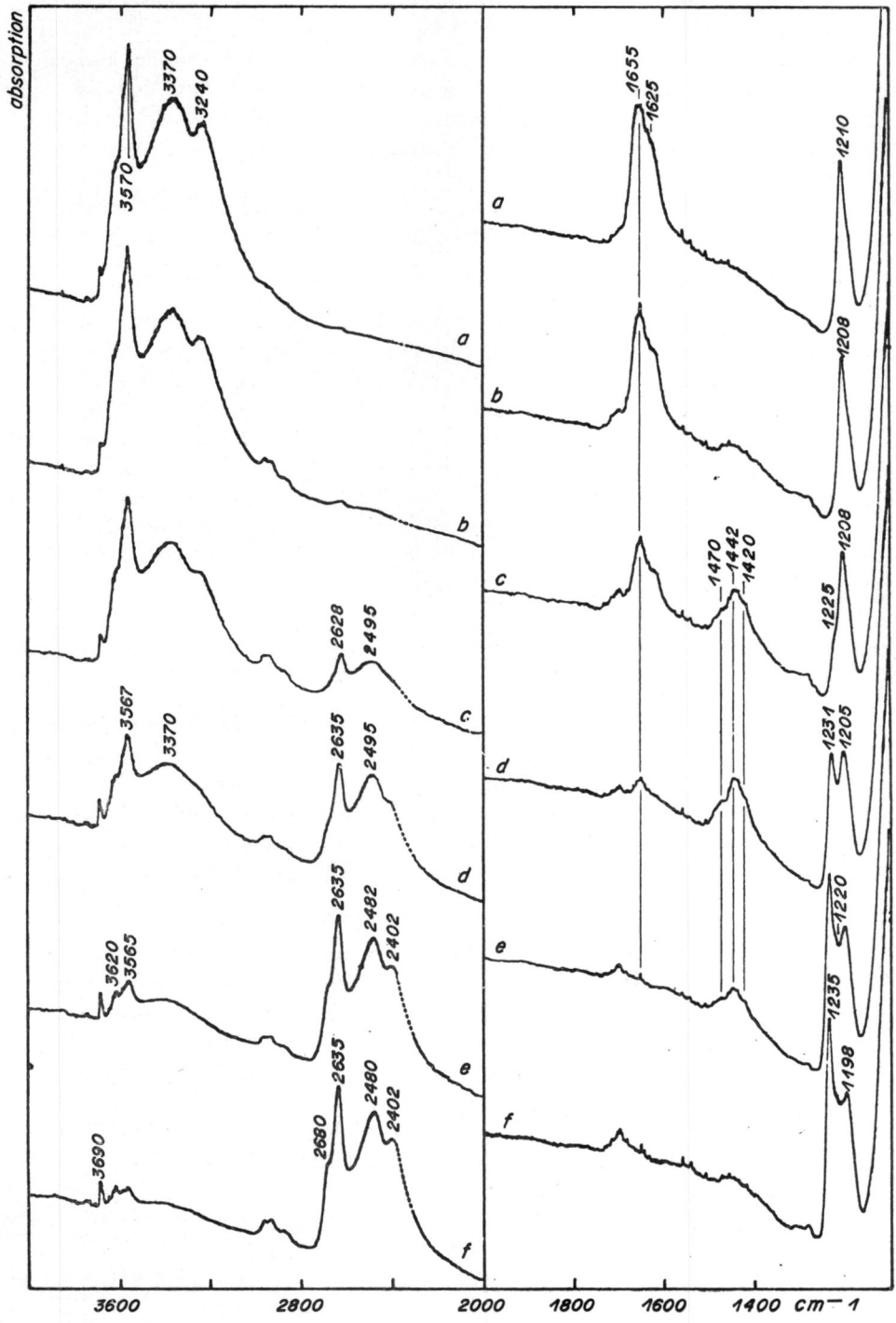


FIG. 20. — *Deutération progressive de la sépiolite séchée à l'air* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*)

Enfin le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD est formé d'un maximum apparent à 1 442 cm^{-1} et de deux épaulements à 1 420 et 1 470 cm^{-1}.

Le rétablissement des couplages intramoléculaires, obtenu en modifiant le taux de substitution de H par D, ne change pas l'allure générale du spectre des vibrations de valence de l'eau. On observe seulement un décalage des fréquences qui passent de 2 495 et 2 628 cm^{-1} sur le spectre OD de HOD (spectre *c* de la fig. 20) à 2 480 et 2 635 cm^{-1} sur le spectre de D_2O (spectre *f* de la fig. 20). L'augmentation de l'écart des fréquences entre les vibrations OD de HOD et les vibrations de valence de D_2O ainsi que la position relative des bandes sont dues aux couplages intramoléculaires qui existent entre les groupes OD de molécules de D_2O de symétrie C_s (BELLAMY et PACE, 1972).

Il y a une très grande analogie entre la sépiolite et l'attapulgite.

L'application du tableau 2 permet de dénombrer les différents types de molécules d'eau, à partir des enregistrements obtenus pour des deutérations partielles des échantillons. Il y a 3 bandes de vibration de déformation angulaire de HOD donc $n + m = 3$. Ne disposant pas d'une seconde équation pour déterminer n et m, nous sommes conduit à considérer les deux seuls cas possibles : $m = 0$ et $m = 1$. Or, nous avons montré plus haut qu'il y avait nécessairement des molécules de symétrie C_s. Dans ces conditions, $m = 1$ et $n = 2$. On en conclut qu'il existe deux types de molécules d'eau dont un a la symétrie C_s et l'autre, la symétrie C_{2v}.

Nous attribuons, par analogie avec ce qu'on a pour la natrolite, la bande à 1 220 et son homologue 1 625 cm^{-1} aux vibrations de déformation angulaire des molécules d'eau de symétrie C_s, et les bandes à 2 480 et 2 635 cm^{-1} et leurs homologues à 3 370 et 3 570 cm^{-1}, aux vibrations de valence de ces mêmes molécules d'eau de symétrie C_s. Ces molécules d'eau contractent des liaisons hydrogène par l'intermédiaire d'un seul de leurs hydroxyles.

La fréquence de vibration de déformation angulaire à 1 235 cm^{-1} et son homologue à 1 655 cm^{-1} indique que les molécules d'eau correspondantes, qui ont la symétrie C_{2v}, ont leurs deux hydroxyles engagés dans des liaisons hydrogène. Les fréquences de vibration de valence de ces molécules d'eau sont voisines de 2 480 cm^{-1} ou de 3 370 cm^{-1} dans la région OH.

En conséquence, dans l'état I, les molécules d'eau présentes dans la sépiolite appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau zéolitiques ou à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation. Une partie des molécules d'eau, sans qu'il soit possible de préciser s'il s'agit de molécules d'eau zéolitiques ou de cristallisation, a la symétrie C_{2v}, l'autre, la symétrie C_s.

2. *Étude de l'eau présente dans la sépiolite déshydratée par mise sous vide. État II.*

Cet état d'hydratation correspond au cas où la sépiolite a perdu une partie seulement de son eau zéolitique. L'argile contient d'après les déterminations que nous avons faites avec la balance de quartz (fig. 4 de l'annexe) environ 13 p. 100 d'eau par rapport à l'échantillon calciné. A cette teneur en eau correspond en moyenne 4 molécules d'eau environ par cation octaédrique de bord. Il reste par conséquent à peu près autant de molécules d'eau zéolitiques que de molécules d'eau de cristallisation.

La figure 21 représente les enregistrements obtenus pour des taux de substitution de H par D croissants.

Le spectre des vibrations de déformation angulaire des molécules de H_2O ou

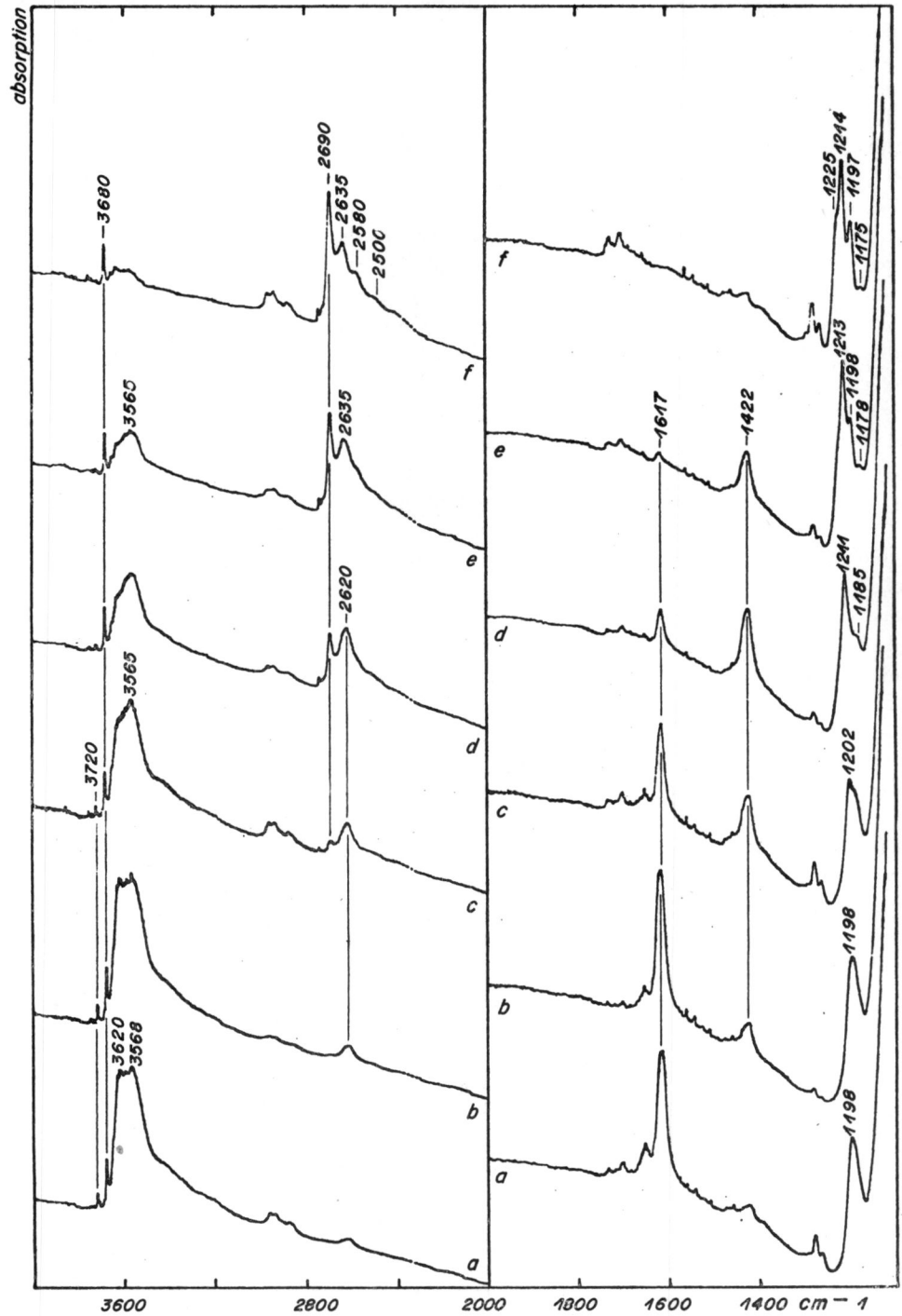


FIG. 21. — *Deutération progressive (a, b, c, d, e et f) de la sépiolite déshydratée par mise sous vide*

de D_2O découplées (spectres *d* et *c* de la fig. 21) est formé d'une seule bande située à 1 617 cm^{-1} pour H_2O et à 1 202 cm^{-1} pour D_2O. Le spectre des vibrations de valence des groupes OH ou OD découplés (spectres *b* et *e* de la fig. 21) est formé d'une seule bande dont le maximum apparent est à 3 565 cm^{-1} pour les groupes OH et à 2 620 pour les groupes OD. Enfin, le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD est formé d'une seule bande dissymétrique dont le maximum apparent est à 1 422 cm^{-1}.

Les indications fournies, en particulier l'existence d'une seule bande de déformation angulaire à 1 617 cm^{-1} pour les molécules de H_2O découplées, tendent à montrer que toutes les molécules d'eau sont identiques et ont la symétrie C_{2v}. Il n'en est rien car, lorsque le taux de D augmente, on n'observe pas deux bandes de part et d'autre de la bande à 2 620 cm^{-1} mais quatre bandes situées à 2 500, 2 580, 2 635 et 2 690 cm^{-1}. La multiplicité des bandes observées est probablement due à la présence de plusieurs types de molécules d'eau.

Afin d'améliorer la résolution des bandes, l'expérience a été reprise à basse température (—125°C) à l'aide du dispositif décrit dans l'annexe (fig. 5).

La figure 22 représente les enregistrements obtenus au cours de cette expérience.

Les bandes d'absorption de l'eau présente dans la sépiolite déshydratée par mise sous vide apparaissent du côté haute fréquence du massif d'absorption de l'eau et ne sont, de ce fait, que faiblement perturbées par l'abaissement de température. On observe simplement un affinement des bandes. On peut considérer, par conséquent, que les bandes à 2 498, 2 576, 2 648 et 2 695 cm^{-1} (spectre *e* de la fig. 22), qui correspondent à l'enregistrement obtenu à —125°C, sont les homologues des bandes à 2 500, 2 580, 2 635 et 2 690 cm^{-1} (spectre *f* de la fig. 21) qui correspondent à l'enregistrement obtenu à la température du spectrographe.

Le spectre des vibrations de déformation angulaire des molécules de H_2O ou de D_2O découplées (spectres *d* et *c* de la fig. 22) est formé d'une seule bande située à 1 612 cm^{-1} pour H_2O et à 1 210 cm^{-1} pour D_2O. Le spectre des vibrations de valence des groupes OD découplés (spectre *b* de la fig. 22) est formé, quant à lui, de trois bandes à 2 600, 2 635 et 2 695 cm^{-1}. Enfin le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD est formé de trois bandes dont deux sont faciles à repérer (1 412 et 1 432 cm^{-1}) et une qui apparaît sous la forme d'un épaulement à 1 417 cm^{-1}. Cet épaulement apparaît clairement sur les enregistrements obtenus avec une échelle des abscisses étalée.

Les enregistrements obtenus à —125°C donnent une résolution équivalente dans la région OH et dans la région OD.

L'application du tableau 2, dont nous avons rappelé l'essentiel dans le chapitre précédent, permet, à partir des enregistrements obtenus pour des deutérations partielles de l'échantillon, de dénombrer les différents types de molécules d'eau. Il y a 3 bandes de vibration de déformation angulaire de HOD, donc $n + m = 3$. On observe, par ailleurs, 4 bandes vibration de valence de l'eau à 3 400, 3 520, 3 580 et 3 625 cm^{-1} et leurs homologues à 2 498, 2 576, 2 648 et 2 695 cm^{-1} donc $2n = 4$. En conséquence, il y a deux types de molécules d'eau dont un a la symétrie C_s et l'autre, la symétrie C_{2v}.

Dans l'état II, les molécules d'eau présentes dans la sépiolite comprennent une fraction de l'ensemble des molécules d'eau zéolitiques et la totalité des molécules d'eau de cristallisation. Les molécules d'eau zéolitiques ont la symétrie C_{2v} et leurs

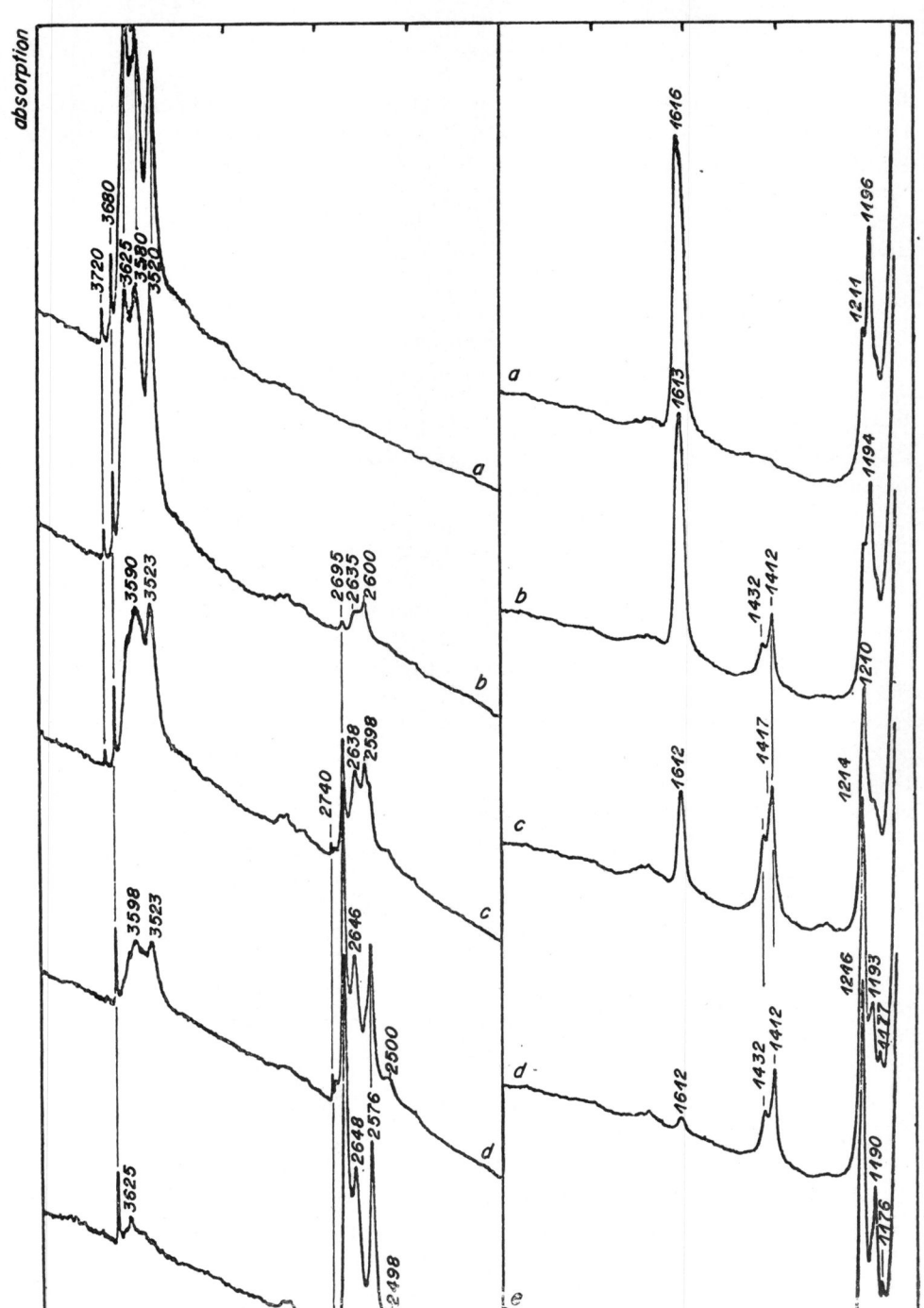


FIG. 22. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *à — 125°C de la sépiolite déshydratée par mise sous vide*

hydroxyles ne sont pas engagés dans des liaisons hydrogène. Les molécules d'eau de cristallisation ont la symétrie C_s et un de leurs hydroxyles est engagé dans une liaison hydrogène avec les molécules d'eau restantes.

3. *Étude de l'eau présente dans la sépiolite déshydratée par chauffage sous vide à 250°C. État III.*

Cet état d'hydratation correspond au cas où la sépiolite a perdu la totalité de son eau zéolitique et la moitié environ de son eau de cristallisation (SERNA, 1973). Il n'y a plus, par conséquent, qu'une molécule d'eau par cation octaédrique de bord.

Sur la figure 23 sont reproduits les spectres d'absorption infrarouge de l'eau présente dans la sépiolite pour des taux de substitution de H par D croissants. Le mode opératoire est celui qui a été décrit pour l'attapulgite déshydratée par chauffage sous vide à 250°C.

Les spectres de vibration de déformation angulaire des molécules H_2O et D_2O découplées (spectres *d* et *c* de la fig. 23) sont formés d'une bande unique à 1 612 cm^{-1} pour H_2O et à 1 194 cm^{-1} pour D_2O. Il n'y a, par conséquent, qu'un seul type de molécules d'eau. L'examen des spectres de vibration de valence des groupes OD découplés (spectre *b* de la fig. 23) indique la présence de deux types de groupes OH. Les uns absorbent à 2 620 cm^{-1} et les autres à 2 638 cm^{-1}. Le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD est formé d'une seule bande résolue dont le maximum est à 1 422 cm^{-1}. On note, lorsque le taux de D augmente, le développement de deux bandes à 2 589 et 2 674 cm^{-1} et la disparition concomitante des bandes à 2 620 et 2 638 cm^{-1}. Cette évolution découle du rétablissement des couplages intramoléculaires.

La résolution des deux bandes à 2 620 et 2 638 cm^{-1} indique que les hydroxyles des molécules d'eau de cristallisation ne sont pas rigoureusement identiques, ce qui leur confère la symétrie C_s. Le petit écart observé (13 cm^{-1}) implique que le découplage qui en résulte est très faible (BELLAMY et PACE, 1972), ce qui explique la non résolution des deux bandes de déformation angulaire de HOD. D'ailleurs, lorsqu'on représente le rapport entre l'écart des fréquences de vibration de valence des groupes OD découplés et l'écart des fréquences de vibration de valence des groupes OD couplés, en fonction de l'écart des fréquences de vibration de déformation de HOD dans le cas de molécules d'eau ayant la symétrie C_s ou C_{2v}, on obtient la droite représentée par la figure 24. Cette représentation implique que les fréquences des groupes OD couplés correspondent uniquement aux couplages intramoléculaires. Nous avons ajouté à la liste des minéraux que nous avons étudiés Na_2 (Fe $(CN)_5NO$), $2H_2O$ et $LiClO_4$, $3H_2O$ qui satisfont à cette condition. La droite que nous trouvons montre que l'écart entre les fréquences de déformation angulaire de HOD de l'eau présente dans la sépiolite est de l'ordre de 7 cm^{-1}. Cet écart implique, pour que les deux bandes de déformation angulaire de HOD soient résolues, que leur largeur à mi-hauteur soit inférieure à 10 cm^{-1} (LUCK et DITTER, 1967-68). Les valeurs observées sur les systèmes étudiés étant toujours nettement supérieures à 10 cm^{-1}, les deux bandes ne peuvent pas en conséquence être résolues. Ce cas particulier illustre les difficultés inhérentes à la mauvaise résolution des bandes.

En conséquence, dans l'état III, les molécules d'eau présentes dans la sépiolite appartiennent à l'ensemble des molécules d'eau de cristallisation. Ces molécules d'eau sont légèrement dissymétriques.

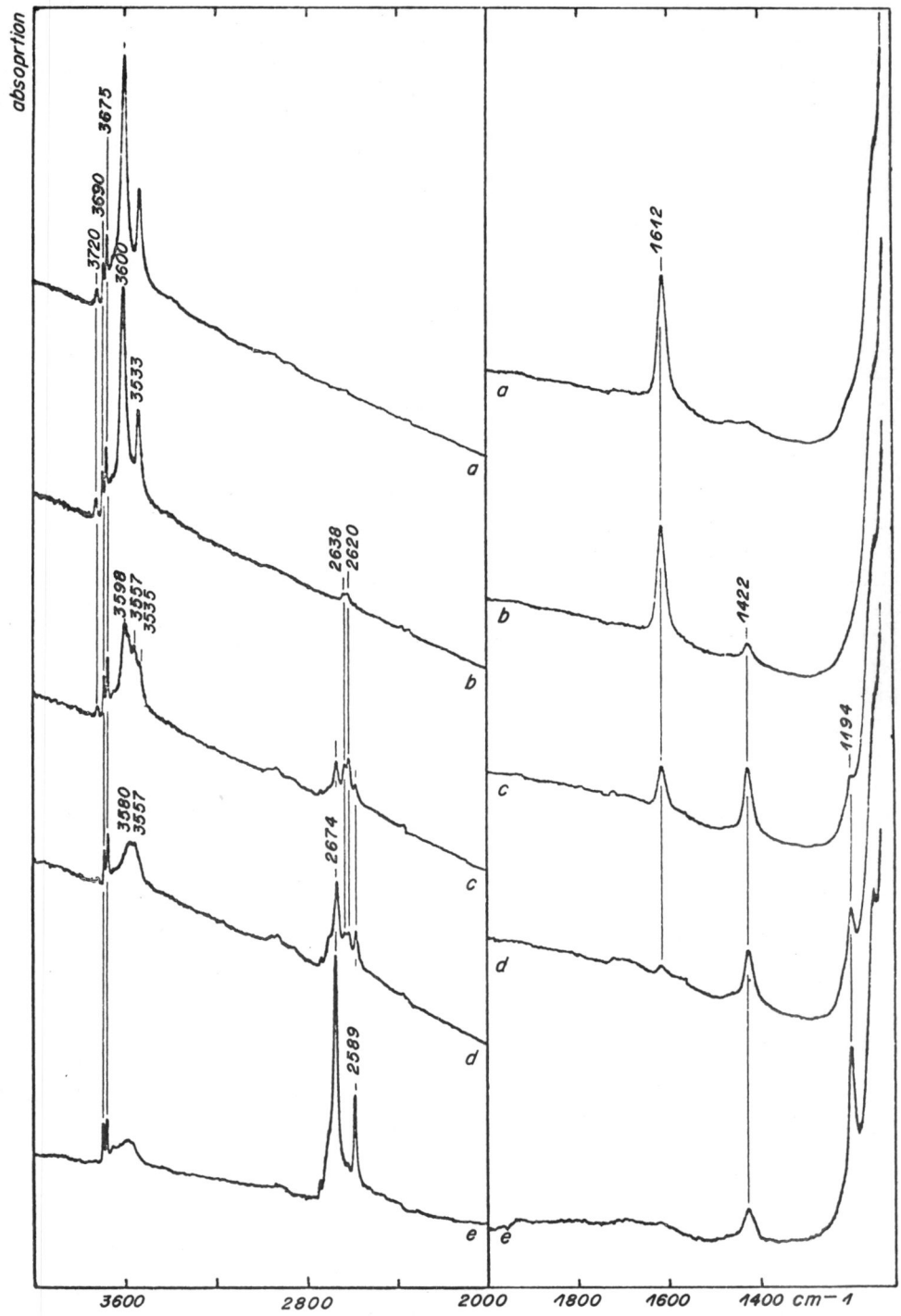


FIG. 23. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de la sépiolite déshydratée par chauffage sous vide à 250°C provoquant le basculement des lattes du minéral*

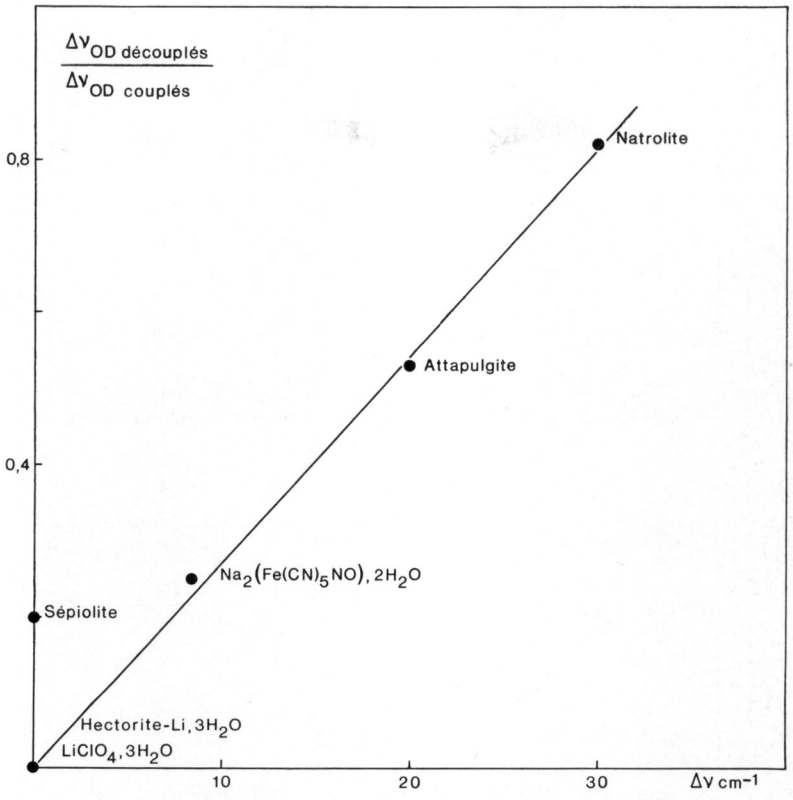


FIG. 24. — *Droite représentant la variation relative des écarts entre les fréquences de vibration de valence des groupements OD découplés et couplés en fonction de l'écart des fréquences des vibrations de déformation angulaire de HOD*

3. — *Conclusion de l'étude des interactions des molécules d'eau zéolitiques et de cristallisation entre elles et avec les groupes hydroxyles du réseau de la sépiolite en fonction de la teneur en eau du minéral*

a) *Interactions H_2O—H_2O.*

L'évolution du spectre infrarouge de la sépiolite en fonction de la teneur en eau du minéral montre l'existence de plusieurs états pour l'eau. Chacun de ces états est représenté schématiquement sur la figure 25.

Dans l'état I, les molécules d'eau zéolitiques et de cristallisation, présentes dans la sépiolite, sont liées entre elles par pont d'hydrogène. Une partie de ces molécules d'eau a la symétrie C_{2v}, l'autre la symétrie C_s.

Dans l'état II, qui concerne les molécules d'eau présentes dans l'argile après la mise sous vide de l'échantillon, il reste les molécules d'eau de cristallisation et quelques molécules d'eau zéolitiques. Les molécules d'eau zéolitiques ont la symétrie C_{2v} et leurs hydroxyles ne sont pas engagés dans des liaisons hydrogène. Par contre, les molécules d'eau de cristallisation ont la symétrie C_s car un de leur hydroxyle forme une liaison hydrogène avec les molécules d'eau zéolitiques.

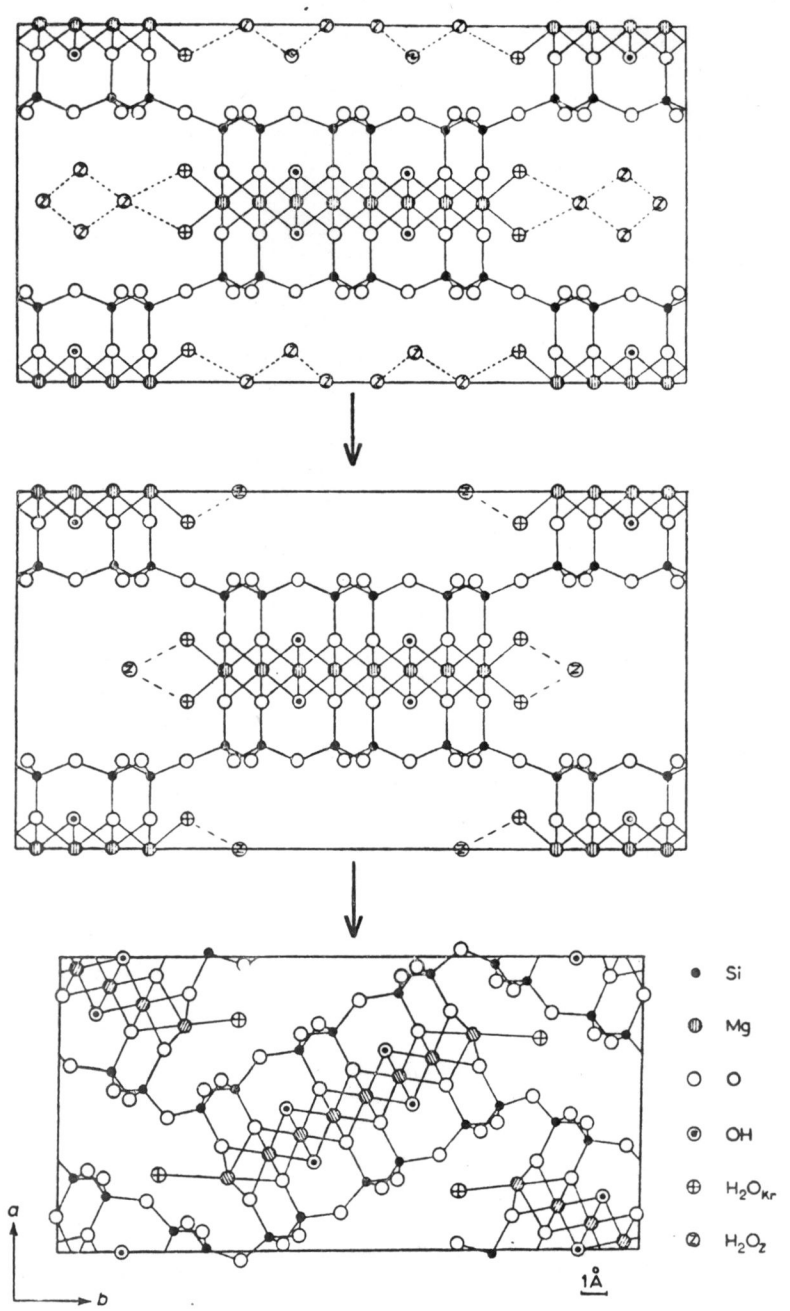


FIG. 25. — *Représentation schématique des états de l'eau présente dans la sépiolite en fonction de la teneur en eau du minéral*

Dans l'état III, les molécules d'eau de cristallisation restantes sont légèrement dissymétriques.

Les conditions de déshydratation, qui correspondent à chacun des états de l'eau définis dans le tableau 6, ne coïncident pas nécessairement avec les paliers de la courbe thermopondérale. On peut cependant rattacher certaines propriétés de la sépiolite aux états de l'eau que nous définissons. C'est le cas de l'adsorption de l'acétone ou du méthanol étudiée par SERNA (1973) qu'il semble plus facile d'interpréter en considérant l'état II, que nous avons défini plus haut, pour lequel il existe effectivement deux types de molécules d'eau : les molécules d'eau zéolitiques et les molécules d'eau de cristallisation.

b) *Interactions H_2O-groupes OH de constitution.*

Parallèlement à l'évolution des bandes d'absorption dues à l'eau présente dans la sépiolite, on note des perturbations au niveau des fréquences des bandes dues aux hydroxyles de constitution du minéral.

Dans l'état I, les hydroxyles de constitution sont perturbés par les molécules d'eau zéolitiques, ce qui entraîne le déplacement de la bande à 3 680 cm^{-1} vers 3 690 cm^{-1}.

Dans l'état II, obtenu par mise sous vide de l'échantillon, les hydroxyles de constitution ne sont pas perturbés et vibrent à la fréquence de 3 680 cm^{-1} voisine de celle du talc (3 677 cm^{-1}). On remarquera que les molécules d'eau zéolitiques qui restent dans l'argile ne se trouvent pas à l'aplomb des cavités hexagonales au fond desquelles se situent les hydroxyles de constitution (fig. 25).

Dans l'état III, obtenu par chauffage sous vide à 250°C, les molécules d'eau de cristallisation restantes se trouvent, à la suite du basculement des lattes, à l'aplomb des cavités hexagonales des lattes voisines (fig. 25) (AHLRICHS, communication personnelle). Seulement la moitié des groupes OH est perturbée, ce qui est conforme à une action ponctuelle de l'eau sur les groupes hydroxyles. L'élimination de l'eau entraîne la disparition de cette perturbation.

CONCLUSION

La dissymétrie des molécules d'eau présentes dans la natrolite résulte de la formation d'une liaison hydrogène entre l'un des hydroxyles de l'eau et un atome d'oxygène appartenant à un tétraèdre dont l'atome de Si^{++++} est substitué par Al^{+++}. Ce résultat montre la possibilité de formation de liaison hydrogène entre les molécules d'eau adsorbées et les atomes d'oxygène d'une smectite qui a ses substitutions isomorphiques localisées dans la couche tétraédrique. En conséquence les interactions de l'eau adsorbée avec le réseau d'une argile qui a ses substitutions isomorphiques localisées dans la couche tétraédrique ne sont pas nécessairement identiques à celles qui apparaissent lorsque le minéral a ses substitutions isomorphiques localisées dans la couche octaédrique.

L'eau zéolitique et l'eau de cristallisation des minéraux fibreux possèdent les mêmes caractéristiques spectroscopiques lorsque les canaux de ces échantillons sont remplis d'eau. Ceci correspond à un état déterminé de l'eau. L'évacuation de l'eau

zéolitique entraîne l'apparition de bandes d'absorption infrarouge nouvelles montrant que l'eau de cristallisation qui reste dans l'argile n'est pas dans le même état que précédemment. Il faut, par conséquent, être prudent lors de l'interprétation des résultats de l'analyse thermique pondérale ou de l'analyse thermique différentielle. En effet, l'apparition sur ces courbes de plusieurs paliers ou de plusieurs pics ne constitue pas une preuve de l'existence, à une teneur en eau donnée, de plusieurs types d'eau. Le caractère non destructif de la technique de deutération partielle présente de ce point de vue un avantage certain.

Reçu pour publication en juillet 1975.

SUMMARY

STUDY OF CLAY HYDRATION : THE WATER-MINERAL INTERACTIONS AND THE WATER RETENTION MECHANISM.
I. — STUDY OF A ZEOLITE (NATROLITE) AND OF TWO FIBROUS MINERALS (ATTAPULGITE AND SEPIOLITE)

The states in which water molecules are found during the dehydration of attapulgite and sepiolite are defined on the basis of infra-red absorption criteria. Next, the structure of the water molecules corresponding to each of these states is studied by the partial deuteration technique.

On air-dried samples, the presence of water molecules with C_s symmetry is detected. In the case of natrolite, the C_s symmetry of the molecules is due to hydrogen bonding between one of the water hydroxyls and an oxygen atom belonging to the tetrahedra where Si^{++++} is replaced by Al^{+++}. In the case of attapulgite and sepiolite which have no replacement of Si^{++++} by Al^{+++}, the C_s symmetry of the molecules is due to hydrogen bonding between water molecules through a single hydroxyl.

Dehydration brings about the appearance of different states for the water, showing the necessity for studying the film of water adsorbed for each of the previously defined states by methods that do not disturb the arrangement of the water molecules : for example, infra-red spectroscopy.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG ÜBER DIE HYDRATATION VON TONEN : WECHSELWIRKUNGEN WASSER MINERAL UND MECHANISMUS DER WASSERZÜRUCKHALTUNG.
I. — UNTERSUCHUNG ÜBER EINEN ZEOLITH (NATROLITH) UND ZWEI FIBRÖSE MINERALE (ATTAPULGIT UND SEPIOLITH)

Es werden zunächst die Lagen in dem sich die Wassermoleküle im Laufe der Dehydratation von Attapulgit und Sepiolith befinden, mit den Kriterien der Infrarotabsorption definiert. Hierauf wird die Struktur der Wassermoleküle in jeder dieser Lagen mit Hilfe der Technik des partiellen Austauschs untersucht.

Es wird in allen luftgetrockneten Untersuchungsproben die Gegenwart von Wassermolekülen mit der Symmetrie C_s entdeckt. Im Fall von Natrolith ist die Symmetrie C_s der Moleküle bedingt durch die Wasserstoffbindung zwischen der einen Hydroxylgruppe des Wassers und einem Sauerstoffatom das zu den Tetraëdern gehört wo Si^{++++} durch Al^{+++} ersetzt ist. Im Fall von Attapulgit und Sepiolith dagegen, die keine Substitution von Si^{++++} durch Al^{+++} aufweisen, ist die Symmetrie C_s bedingt durch die Bildung einer Wasserstoffbindung zwischen Wassermolekülen über eine einzige Hydroxylgruppe.

Die Dehydratation bringt es mit sich, dass das Wasser in verschiedenen Lagen erscheint. Dies zeigt die Notwendigkeit, den adsorbierten Wasserfilm für jede der vorher definierten Lagen zu untersuchen, und zwar mit Methoden, die die Anordnung der Wassermoleküle nicht stören : beispielsweise mit der Infrarot-Spektroskopie.

РЕЗЮМЕ

Изучение оводнения глины : взаимодействие молекул воды натролита, атттапульгита и сепиолита, между собой и с сетью.

Р. ПРОСТ

Прежде всего, на базе критериев поглощения инфра-красных лучей, определяется состояние молекул воды при обезвоживании аттапульгита и сепиолита. Затем, с помощью частичной их дейтеризации, изучается структура молекул воды находящихся в каждом из этих состояний.

Во всех образцах, высушенных на воздухе, детектируется присуствие молекул воды с симетрией C_5. В случае натролита симетрия C_5 молекул зависит от образования водородной связи между одним из гидроксилов воды и одним из атомов кислорода тетраэдров в которых Si^{++++} замещен Al^{+++}. В то время, как в случае аттапульгита и сепиолита у которых Al^{+++} не заменяет Si^{++++}, симетрия C_5 молекул связана с образованием, с помощью одного только гидроксила, водородной связи между молекулами самой воды.

Обезвоживание приводит значит к появлению разных состояний воды, указывающих на необходимость изучения пленки адсорбции каждого из этих состояний, определых ранее при помощи методов не нарушающих размещения ее молекул : например, инфра-красной спектроскопии.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages généraux

BARCHEWITZ P., 1961. *Spectroscopie infrarouge.* Tome I. Vibrations moléculaires, 238 p., Gauthier-Villars, Paris.

BARCHEWITZ P., 1967. *Spectroscopie infrarouge.* Tome II. Fonction potentielle. Moment dipolaire. Notions de spectrochimie, 107 p., Gauthier-Villars, Paris.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1963. *Minéralogie des argiles,* 355 p., Masson, Paris.

EISENBERG D., KAUZMANN W., 1969. *The structure and properties of water,* 296 p., Clarendon Press, Oxford.

FARMER V. C., 1974. *The infrared spectra of minerals,* 539 p., Mineralogical Society, Londres.

FRANKS F., 1972. *Water. A comprehensive Treatise.* Vol. 1 : The physics and physical chemistry of water, 596 p.; Vol. 2 : Water in crystalline hydrates. Aqueous solutions of simple nonelectrolytes, 684 p.; Vol. 3 : Aqueous solutions of simple electrolytes, 472 p. Plenum Press, New-York, Londres.

HERZBERG G., 1945. *Molecular spectra and molecular structure.* II. Infrared and raman spectra of polyatomic molecules, 632 p., Van Nostrand Company, Princeton, New Jersey, New York.

WILSON E. B., DECIUS J. C., CROSS P. C., 1955. *Molecular vibrations. The theory of infrared and raman vibrational spectra,* 388 p., McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto, Londres.

Articles

ALVAREZ-ESTRADA D., SANCHEZ-CONDE C., 1967. Estudio y caracterización de una atapulgita. *Bol. Soc. Esp. de Ceramica*, **6**, 717-730.

BELLAMY L. J., BLANDAMER M. J., SYMONS M. C. R., WADDINGTON D., 1971. Infra-red spectra of salt hydrates. *Trans. Faraday Soc.*, **67**, 3435-3440.

BELLAMY L. J., PACE R. J., 1972. The effects of non-equivalent hydrogen bonding on the stretching frequencies of primary amines and of water. *Spectrochim. Acta*, **28 A**, 1869-1876.

BENEDICT W. S., GAILAR N., PLYLER E. K., 1956. Rotation-vibration spectra of deuterated water vapor. *J. Chem. Phys.*, **24**, 1139-1165.

BRADLEY W. F., 1940. Structure of attapulgite. *Am. Mineralogist.*, **25**, 405-410.

BRAUNER K., PREISINGER A., 1956. Struktur und Entstehung des Sepioliths. *Tschermaks Miner. Petr. Mitt.*, **6**, 120-140.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1961. In BROWN G., *The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals*. Sepiolite. 325-341, Mineralogical Society, Londres.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1961. In BROWN G., *The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals*. Palygorskite, 343-352, Mineralogical Society, Londres.

CANNINGS F. R., 1968. An infrared study of hydroxyl groups on sepiolite. *J. Phys. Chem.*, **72**, 1072-1074.

DRITS V. A., ALEXANDROVA V. A., 1966. A propos de la nature cristallochimique de la palygorskite (en russe). *Zap. Vses. Miner. Obshch.*, **95**, 551-560.

FALK M., FORD T. A., 1966. Infrared spectrum and structure of liquid water. *Can. J. Chem.*, **44**, 1699-1707.

FALK M., KNOP O., 1973. In FRANKS F., *Water. A comprehensive treatise*. Vol. **2** : Water in stoichiometric hydrates. 55-113, Plenum Press, New-York, Londres.

FARMER V. C., RUSSELL J. D., 1971. Interlayer complexes in layer silicates. The structure of water in lamellar ionic solutions. *Trans. Faraday Soc.*, **67**, 2737-2749.

FIFER R. A., SCHIFFER J., 1970. Intramolecular interactions in the water molecule : The stretch-stretch interaction force constant of water molecules in hydrogen-bonded systems. *J. Chem. Phys.*, **52**, 2664-2670.

FIFER R. A., SCHIFFER J., 1971. Intermolecular coupling of water molecules in copper chloride dihydrate. *J. Chem. Phys.*, **54**, 5097-5102.

FISHMAN E., SAUMAGNE P., 1965. Near-infrared spectrum of liquid water from 30 to 374°. *J. Phys. Chem.*, **69**, 3671.

FRIPIAT J. J., ROUXHET P., JACOBS H., 1965. Proton delocalization in micas. *Am. Mineralogist*, **50**, 1937-1958.

GARD J. A., FOLLETT E. A. C., 1968. A structural scheme for palygorskite. *Clay Miner.*, **7**, 367-370.

GLAESER R., MANTINE I., MERING J., 1967. Observations sur la beidellite. *Bull. Groupe fr. Argiles*, t. XIX, 125-130.

GREINACHER E., LÜTTKE W., MECKE R., 1955. Infrarotspektroskopische Untersuchungen an Wasser, geloöst in organischen Lösungsmitteln. *Z. Elektrochem.*, **59**, 23-31.

HAYASHI H., OTSUKA R., IMAI N., 1969. Infrared study of sepiolite and palygorskite on heating. *Am. Mineralogist*, **53**, 1613-1624.

HUGGINS C. W., DENNY M. V., SHELL H. R., 1962. Palygorskite, an asbestiform mineral. *Rep. U. S. Bur. Mines No. 6071*, p. 17.

IMAI N., OTSUKA R., KASHIDE H., HAYASHI H., 1969. Dehydration of palygorskite and sepiolite from the Kuzuu District, Tochigi Pref., Central Japan. *Proc. Int. Clay Conf.*, 99-108.

KLING R., SCHIFFER J., 1971. Intra- and intermolecular interactions in and between water molecules in calcium sulfate dihydrate. *J. Chem. Phys.*, **54**, 5331-5338.

LONGCHAMBON H., 1936. Sur les propriétés caractéristiques des palygorskites. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **203**, 672-674.

LONGCHAMBON H., 1937. Sur certaines caractéristiques de la sépiolite d'Ampandandrava. *Bull. Soc. Fr. Min.*, **60**, 232-276.

LUCK W. A. P., DITTER W., 1967-68. Band overlapping and water structure. *J. Mol. Structure*, **1**, 339-348.

MEIER W. M., 1960. The crystal structure of natrolite. *Z. Kristallogr.*, **113**, 430-444.

MENDELOVICI E., 1973. Infrared study of attapulgite and HCI treated attapulgite. *Clays and Clay Miner.*, **21**, 115-119.

NAGY B., BRADLEY W. F., 1955. The structural scheme of sepiolite. *Am. Mineralogist*, **40**, 885-892.

NAKAMOTO K., MARGOSHES M., RUNDLE R. E., 1955. Stretching frequencies as a function of distances in hydrogen bonds. *J. Am. Chem. Soc.*, **77**, 6480-6486.

NATHAN Y., 1969. Dehydration of Palygorskites and sepiolites. *Proc. Int. Clay Conf.*, 91-98.

NOVAK A., 1974. In *Structure and bonding*. Vol. 18 : Hydrogen bonding in solids. Correlation of spectroscopic and cristallographic data. 177-216, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

OTSUKA R., HAYASHI H., SHIMODA S., 1968. Infrared absorption spectra of sepiolite and palygorskite. *Mem. School Sci. Eng. Waseda Univ.*, **32**, 13-24.

OTSUKA R., HAYASHI H., IMAI N., 1970. Thermal analysis study of analcime, natrolite and laumontite. *Mem. School Sci. Eng. Waseda Univ.*, **34**, 107-123.

PANESH V. I., NASEDKINA V. Kh., NASEDKIN V. V., 1967. Caractéristiques minéralogiques et particularités de la déshydratation des minéraux du groupe des zéolites (en russe). *Vod. Vulkanicheskie Stekla Postvulkanicheskie Miner., Akad. Nauk. SSSR, Inst. Geol. Rud. Mestorozh., Petrogr., Mineral. Geokhim.*, 56-92.

PENG C. J., 1955. Thermal Analysis study of the natrolite group. *Am. Mineralogist*, **40**, 834-856.

PERRAM J. W., 1968. Interpretation of spectra. *J. Chem. Phys.*, **49**, 4245-4246.

PREISINGER A., 1959. X-Ray study of the structure of sepiolite. *Proc. Sixth Nat. Conf. on Clays and Clay Miner.*, 61-67.

PREISINGER A., 1961. Sepiolite and related compounds : its stability and application. *Proc. Tenth Nat. Conf. on Clays and Clay Miner.*, 365-371.

PROST R., 1969. Remarques générales sur l'application de la spectroscopie infrarouge à l'étude des silicates. *Ann. agron.*, **20** (6), 547-564.

PROST R., 1971. Spectre infrarouge de l'eau adsorbée sur les argiles saturées par du lithium pour des teneurs en eau inférieures à 5 p. 100. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. **273**, série D, 1467-1469.

PROST R., 1973. *a*). Spectre infrarouge de l'eau présente dans l'attapulgite et la sépiolite. *Bull. Groupe fr. Argiles*, XXV, 53-63. *b*) The influence of the Christiansen effect on *i. r.* spectra of powders. *Clays and Clay Miner.*, **21**, 363-368.

PROST R., 1974. Spectre *i. r.* de l'eau présente dans la natrolite. *Spectrochim. Acta*, **30 A**, 1855-1859.

RAUTUREAU M., 1974. *Analyse structurale de la sépiolite par microdiffraction électronique. Relations avec les propriétés physicochimiques.* Thèse Fac. Sci. Orléans.

RAUTUREAU M., TCHOUBAR C., 1972. Étude morphologique de la sépiolite par microscopie électronique. *J. Microscopie Paris*, **14**, 139-146.

RAUTUREAU M., CAILLÈRE S., 1974. Interprétation des courbes thermiques en fonction des données structurales de la sépiolite. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. **278**, série D, 1661-1664.

SAUMAGNE P., JOSIEN M. L., 1958. Vibrations de valence des molécules H_2O, D_2O et HDO dans les solvants organiques. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 813-820.

SAUMAGNE P., 1970. Comparison between two models of complexed water : open water dimer and I-I complexed water. *J. Chem. Phys.*, **53**, 3768.

SEIDL V., KNOP O., FALK M., 1969. Infrared studies of water in crystalline hydrates : gypsum, $CaSO_4$, 2 H_2O. *Can. J. Chem.*, **47**, 1361-1368.

SERNA-PEREDA C., 1973. *Naturaleza y propiedades de la superficie de la sepiolita.* Thèse, Madrid.

TARASEVICH Ju., 1970. Études spectrales de la déshydratation thermique de la palygorskite (en russe). *Dopov. Akad. Nauk Ukr. SSR*, **10**, série B, Kiev, 938-942.

TARASEVICH Ju., OVCHARENKO F. D., 1971. Étude par spectroscopie de l'interaction de l'eau avec la surface de la palygorskite (en russe). *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **200**, 897-900.

TORRIE B. H., BROWN I. D., PETCH H. E., 1964. Neutron diffraction determination of the hydrogen positions in natrolite. *Can. J. Phys.*, **42**, 229-240.

TSUBOI M., 1950. On the positions of the hydrogen atoms in the crystal structure of muscovite, as revealed by the infra-red absorption study. *Bull. Chem. Soc. Jap.*, **23**, 83-88.

VENIALE F., 1972. Analisi termo-igrometrica di processi di disidratazione in opali, idro-crisotilo, sepioliti e palygorskiti. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petr.*, **28**, 339-350.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1976

Dépôt légal : 1er trimestre 1976. N° d'impression : 2125

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (5), 463-535.

ÉTUDE DE L'HYDRATATION DES ARGILES : INTERACTIONS EAU-MINÉRAL ET MÉCANISME DE LA RÉTENTION DE L'EAU (1)

II. — Étude d'une smectite (hectorite)

R. PROST

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

La méthodologie utilisée pour l'étude de l'eau présente dans la natrolite, l'attapulgite et la sépiolite est appliquée au cas de l'eau adsorbée sur une smectite : l'hectorite. Plusieurs états de l'eau sont définis au cours de la déshydratation du minéral. L'étude pour chacun de ces états de la structure du film d'eau et des interactions des molécules d'eau adsorbées avec les groupes OH de constitution de l'argile nous a conduit :

1° à proposer un modèle pour l'arrangement des molécules d'eau dans l'espace interlamellaire des systèmes hydratés à une couche,

2° à calculer pour différentes teneurs en eau de l'argile le pourcentage de la surface du minéral réellement recouverte par l'eau,

3° à estimer pour les systèmes ne dépassant pas l'état monocouche les quantités d'eau adsorbées sur les surfaces internes et sur les surfaces externes de l'argile.

INTRODUCTION

L'influence des argiles gonflantes sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols est souvent déterminante. Il est donc nécessaire pour mieux comprendre ces propriétés d'entreprendre des études allant dans le sens d'une meilleure connaissance du mécanisme de l'hydratation des smectites.

L'hectorite a été choisie comme modèle d'argile gonflante. Cette smectite présente, en effet, pour l'étude de l'eau absorbée par spectroscopie infrarouge, deux avantages :

(1) La première partie de ce travail est parue dans le n°4, 1975 des *Annales agronomiques*, p. 401-461.

1° la bande de vibration de valence des groupes OH de constitution située à 3680 cm^{-1} est peu intense et ne gêne pas l'examen des bandes de vibration de valence de l'eau ;

2° cette argile donne d'excellents films autoporteurs.

Chapitre III

ÉTUDE DE L'EAU PRÉSENTE DANS L'HECTORITE

1. — Propriétés physico-chimiques du minéral

L'échantillon que nous avons étudié provient du gisement d'Hector (Californie).

Morphologie.

A l'état naturel cette argile se présente sous la forme d'une roche de couleur blanche qui contient un peu de $CaCO_3$ comme impureté. Ce minéral se disperse facilement dans l'eau et donne un gel. La séparation granulométrique de la fraction inférieure à 2 μm doit se faire sur une suspension très diluée (quelques mg/cm^3). L'étude du minéral par microscopie électronique (Méring et Oberlin, 1971), montre que les particules élémentaires ont la forme de lattes minces de 1 μm de long et 0,1 μm de large. Ces lattes sont en fait la juxtaposition bord à bord, suivant l'axe de la latte, de monocristaux dont la largeur n'excède pas 200 Å.

Composition chimique.

L'hectorite a la formule chimique suivante :

$$[Si_8^{++++}]\ [Mg_{5,42}^{++}\ Li_{0,58}^{+}]\ [(F^-, OH^-)_2]\ [O_{20}^{--}]\ M_{0,58}^{+}$$

Du point de vue de sa constitution chimique ce minéral est donc caractérisé par une teneur en fluor importante. Le déficit de charge positive qui résulte de la substitution dans la couche octaédrique d'ions Mg^{++} par des ions Li^+, est compensé par des cations interfoliaires échangeables. La capacité d'échange du minéral est de 76 méq. pour 100 g d'argile séchée à 300°C sous vide, c'est-à-dire débarrassée de la totalité de son eau d'hydratation.

L'argile est mise sous la forme homoionique souhaitée par contacts répétés, généralement quatre, avec une solution du chlorure du cation désiré ; l'excès de sel étant éliminé par lavage jusqu'à ce qu'on retrouve la capacité d'échange du minéral. Nous avons étudié l'hectorite sous les formes homoioniques suivantes :

$$Li^+,\ Na^+,\ K^+,\ Cs^+,\ Mg^{++},\ Ca^{++},\ Sr^{++} \text{ et } Ba^{++}$$

Structure.

L'hectorite est une smectite trioctaédrique à substitutions octaédriques. Sa structure est proche de celle du talc qui constitue le modèle idéal.

Surface.

Les monocristaux qui forment les lattes sont constitués par la superposition de plusieurs feuillets élémentaires. On distingue généralement :

— la surface externe du minéral dont l'aire est égale à la surface développée du parallélépipède formé par le monocristal. Cette surface correspond, en particulier, à la surface accessible à l'azote quand l'hectorite est déshydratée. La détermination de l'aire de la surface peut, par conséquent, être effectuée par la méthode décrite par BRUNAUER, EMMETT et TELLER (1945) ;

— la surface totale du minéral dont l'aire est égale à la surface développée de tous les feuillets élémentaires qui constituent le monocristal, séparés, par exemple, avec de l'eau. L'accessibilité de cette surface à l'éthylène glycol est mise à profit dans la technique développée par DYAL et HENDRICKS (1950) pour en déterminer l'aire ;

— la surface interne. Elle existe seulement quand les feuillets de l'argile sont écartés, en particulier par de l'eau. L'aire de cette surface est la différence entre l'aire de la surface totale et l'aire de la surface externe.

Isothermes d'adsorption d'eau.

Elles ont été établies à 20°C en adsorption et en désorption pour tous les échantillons d'hectorite étudiés. La figure 26 représente le schéma du montage que nous

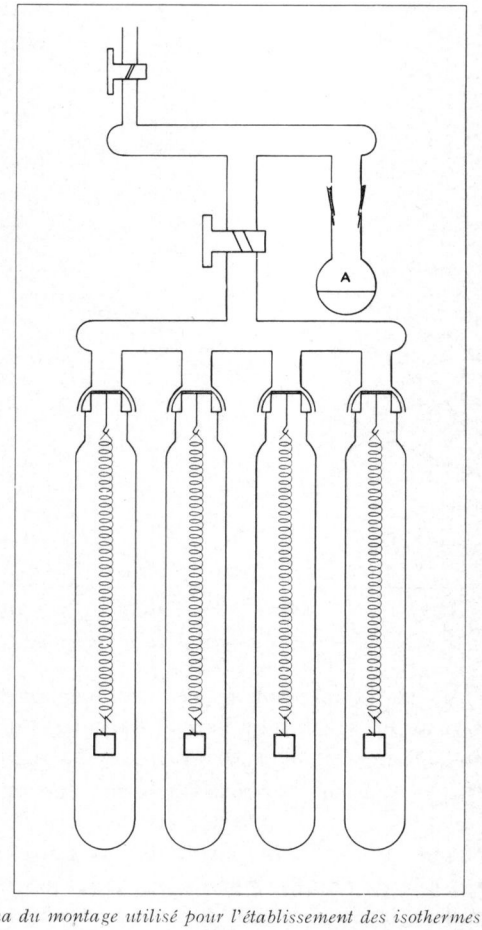


FIG. 26. — *Schéma du montage utilisé pour l'établissement des isothermes d'adsorption d'eau*

avons utilisé. Les variations de poids sont déterminées en suivant les changements de cote de l'extrémité de chaque spirale de quartz à l'aide d'un cathétomètre. Les échantillons ont été préalablement déshydratés par mise sous un vide de 10^{-3} mm de Hg à 40°C, pendant deux jours. Les teneurs en eau ont toutefois été calculées par rapport au poids de l'échantillon chauffé à 300°C sous un vide de 10^{-2} mm de Hg. Ce qui

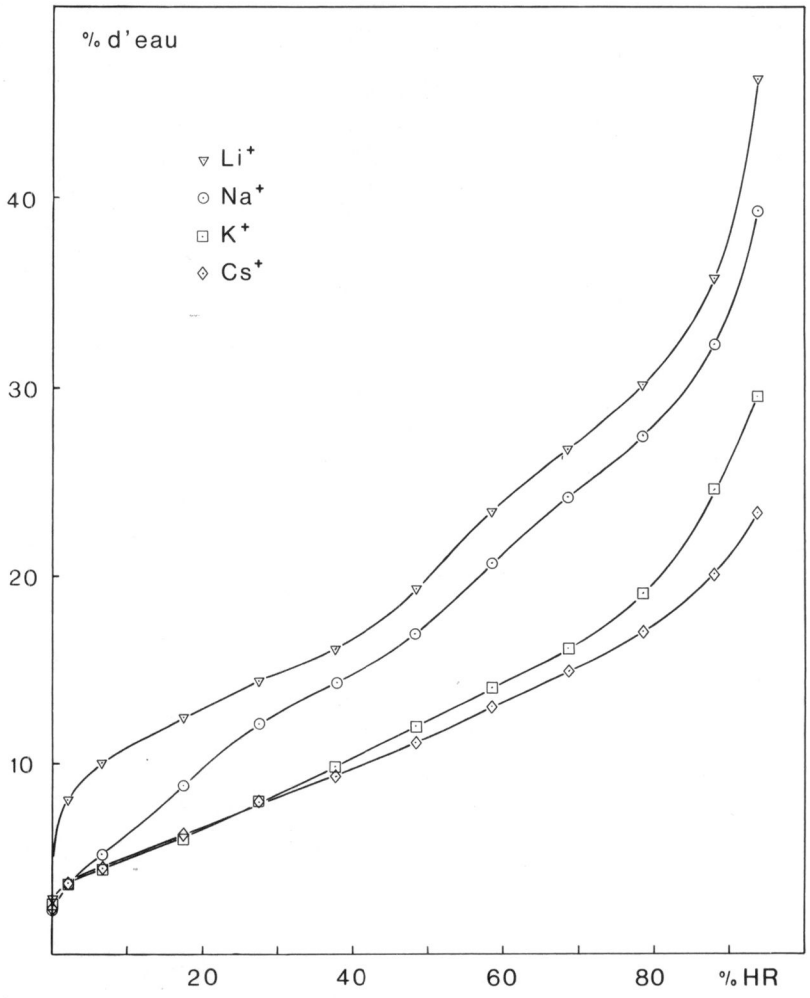


FIG. 27 A. — *Isothermes d'adsorption d'eau de l'hectorite, à 20°C*

fait qu'au point zéro de l'isotherme, tous les échantillons contiennent une quantité d'eau variable suivant la nature du cation. Seuls les résultats obtenus en désorption ont été représentés sur la figure 27 (A et B). Ceci pour deux raisons :

— la plupart des expériences de spectroscopie infrarouge ont été faites en désorption ;

— il est pratiquement impossible de partir d'un système complètement déshydraté sans prendre le risque de transformer l'argile de façon irréversible. Il est en effet nécessaire de chauffer certains échantillons jusqu'à 300°C pour éliminer la tota-

lité de l'eau d'hydratation. C'est, en particulier, le cas pour l'hectorite saturée par des cations bivalents. L'aptitude des échantillons chauffés à une température aussi élevée à se réhydrater est notablement modifiée (RUSSEL et FARMER, 1964). Si, pour éviter ces problèmes, on part de systèmes partiellement déshydratés, alors

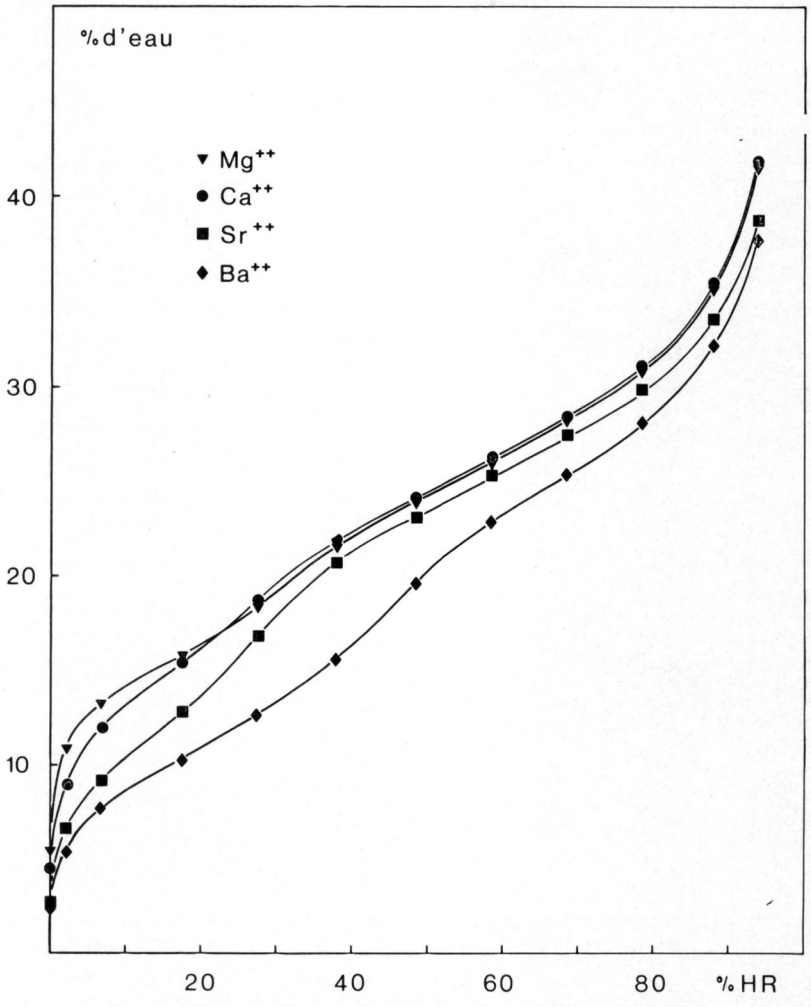


FIG. 27 B. — *Isothermes d'adsorption d'eau de l'hectorite, à 20°C*

l'allure de l'isotherme dépendra de la teneur en eau initiale. Au contraire, les isothermes obtenues en désorption sont reproductibles à la seule condition de partir de systèmes suffisamment hydratés (MOONEY *et al.*, 1952 *a* et *b*). Les isothermes présentées satisfont à cette condition.

Les teneurs en eau des échantillons placés dans une humidité relative nulle (1) sont rassemblées dans le tableau 7. On constate que la quantité d'eau fixée dans ces conditions dépend de la nature du cation échangeable.

(1) Quand nous parlons d'humidité relative nulle, il s'agit en fait de celle fixée par de l'acide sulfurique concentré (d = 1,84) et qui est égale à 0,002 lorsque la température est de 20°C (GREENEWALT, 1925).

Variation des distances interfeuillets en fonction de la teneur en eau.

Cette mesure est faite par diffraction des RX. Le dépôt orienté d'hectorite est placé dans une enceinte thermostatée à 20°C où il est possible de le maintenir à une humidité convenable. Les dépôts orientés d'argile de départ ont été obtenus par évaporation lente d'une suspension sur une lame de verre, à une humidité relative de 60 p. 100, puis réhydratés par mise en contact avec une pression de vapeur d'eau saturante. La figure 28 (A et B) représente les courbes d'ouverture des différents échantillons obtenus en désorption, en fonction des teneurs en eau.

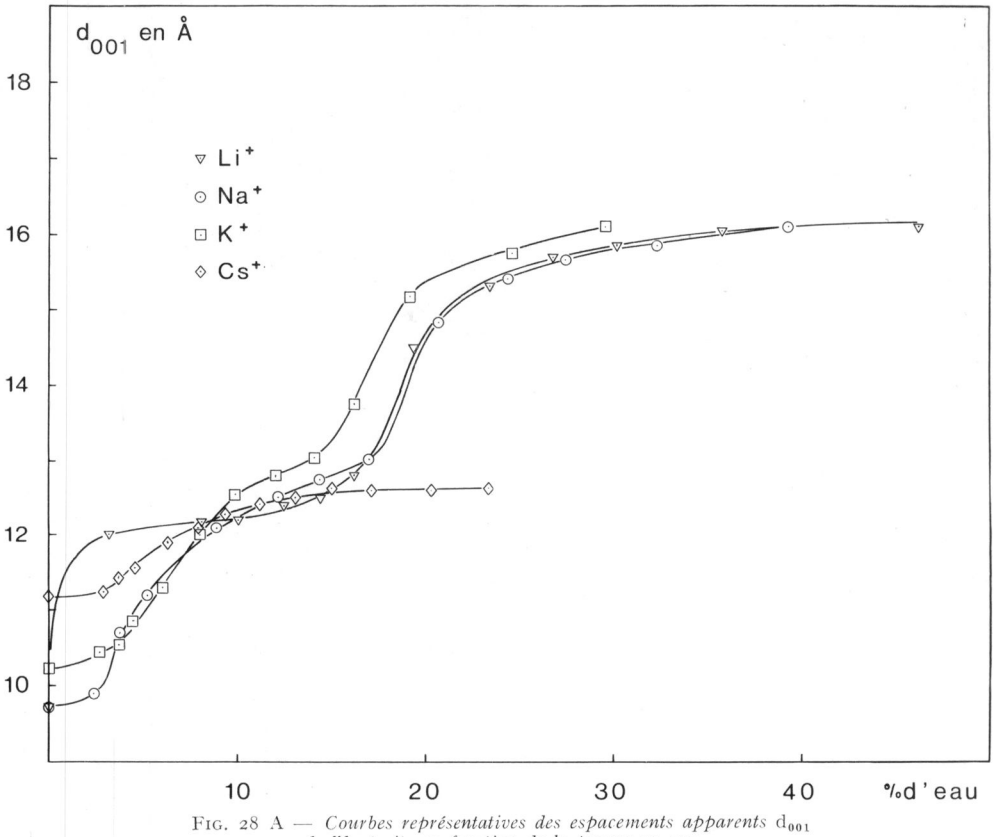


FIG. 28 A — *Courbes représentatives des espacements apparents* d_{001} *de l'hectorite en fonction de la teneur en eau*

A 0 p. 100 d'humidité relative, les espacements d_{001} apparents (tabl. 7) observés pour l'hectorite saturée par Li^+ ou Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} sont compatibles avec l'ouverture de la totalité des feuillets. LE RENARD et MAMY (1971) trouvent en effet, dans les mêmes conditions, une ouverture rationnelle à 11,9 Å, qui correspond à la formation d'une monocouche d'eau, pour une phlogopite altérée saturée par Ca^{++}. Les espacements d_{001} apparents observés avec l'hectorite-Na, K ou Cs ne satisfont en aucun cas à cette condition. En particulier, dans le cas de l'hectorite-Cs, l'espacement d_{001} apparent observé correspond à l'épaisseur du feuillet à laquelle s'ajoute l'encombrement des cations Cs^+.

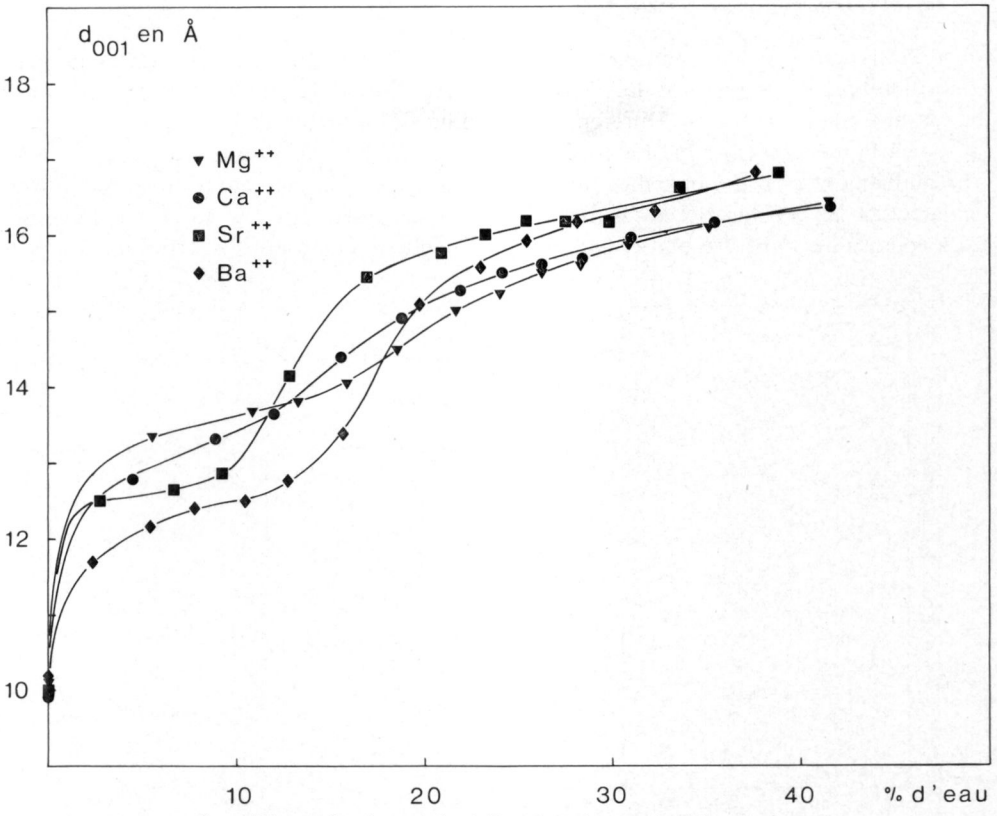


FIG. 28 B. — *Courbes représentatives des espacements apparents* d_{001} *de l'hectorite en fonction de la teneur en eau*

TABLEAU 7

Quantité d'eau fixée et espacement d_{001} *apparent des échantillons placés dans l'humidité relative fixée par de l'acide sulfurique concentré*

Hectorite	Quantité d'eau fixée en p. 100	d_{001} apparent en Å
Li	3,14	12
Na	2,32	9,9
K	2,69	10,45
Cs	2,84	11,25
Mg	5,51	13,33
Ca	4,43	12,8
Sr	2,72	12,52
Ba	2,30	11,7

Analyse thermique différentielle (A.T.D.).

Nous avons repris l'expérience faite par HENDRICKS *et al.* (1940) sur la montmorillonite. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareil Du Pont de Nemours dans une cellule D.S.C. (« Differential Scanning Calorimeter Cell »).

La figure 29 rassemble les courbes obtenues dans le cas de l'hectorite-Mg et Ca préalablement conditionnée dans une atmosphère à 0 puis 20 et 50 p. 100 d'humidité relative et les courbes obtenues dans le cas de l'hectorite-Mg, Ca, Li et Na, lorsque ces échantillons ont été placés dans une atmosphère à humidité relative nulle.

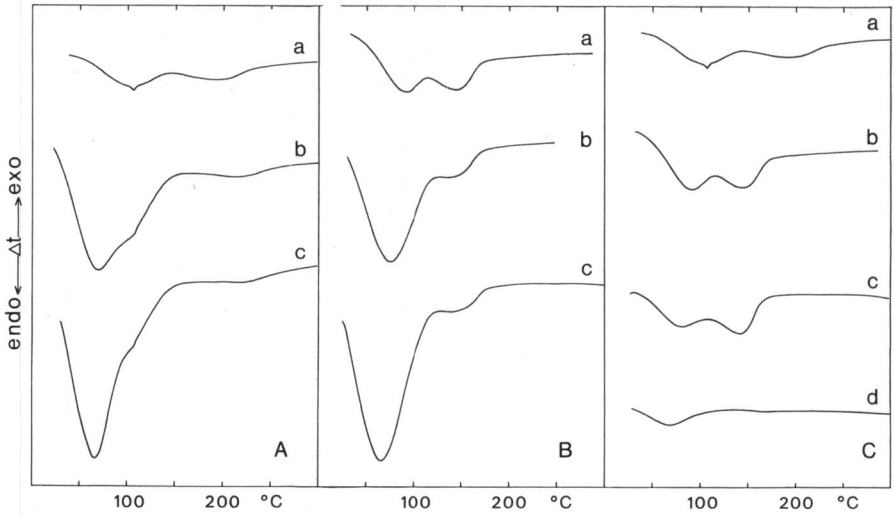


FIG. 29. — *Courbes d'analyse thermique différentielle de l'hectorite*

A : Hectorite-Mg. Les courbes *a*, *b* et *c* correspondent respectivement à l'argile conditionnée dans une humidité relative de 0 puis 20 et 50 p. 100.

B : Hectorite-Ca. Les courbes *a*, *b* et *c* correspondent respectivement à l'argile conditionnée dans une humidité relative de 0 puis 20 et 50 p. 100.

C : Courbes d'analyse thermique différentielle de l'hectorite conditionnée dans une humidité relative de 0 p. 100. Les courbes *a*, *b*, *c* et *d* correspondent respectivement à l'hectorite-Mg, Ca, Li et Na.

Cette expérience montre que le départ de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Mg se fait en trois étapes distinctes, respectivement à 65, 100 et 200°C. Il en est de même pour l'hectorite-Ca ; l'étape intermédiaire étant bien mise en évidence sur la courbe correspondant à 0 p. 100 d'humidité relative. Dans ce cas, cependant, les températures de départ à 65, 90 et 140°C sont un peu plus rapprochées. Si on compare maintenant les courbes obtenues avec l'hectorite-Mg, Ca, Li et Na placée dans une atmosphère à 0 p. 100 d'humidité relative, on voit que l'hectorite-Li a le même comportement que l'hectorite-Mg et Ca, mais que l'hectorite-Na ne présente qu'un seul départ à 65°C.

L'identité des courbes d'A.T.D., obtenues avec l'hectorite et la montmorillonite saturée par les cations alcalins et alcalinoterreux, permet d'étendre les résultats obtenus dans le cas de la montmorillonite-K, Cs, Sr et Ba à l'hectorite saturée par les mêmes cations. On attribue, comme HENDRICKS *et al.* (1940), les pics endothermiques haute

température, observés dans le cas de l'hectorite saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}, à l'eau de solvatation des cations échangeables. Pour ces échantillons, il y a d'abord élimination de l'eau dite de remplissage, puis de l'eau de solvatation des cations. Par contre, pour les échantillons saturés par Na^+, K^+ ou Cs^+ qui ne donnent pas de pic endothermique haute température, aucune distinction n'apparaît entre ces deux ensembles de molécules d'eau qui s'éliminent simultanément.

Conclusion.

Qu'il s'agisse des isothermes de désorption d'eau, des mesures des espacements d_{001} apparents ou des courbes d'A.T.D., l'ensemble des échantillons étudiés forme deux groupes suivant la nature des cations échangeables.

On distingue l'hectorite saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}, et par Na^+, K^+ et Cs^+. A 0 p. 100 d'humidité relative (tabl. 7), les échantillons saturés par Li^+ Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} contiennent de l'eau de solvatation des cations échangeables. Par contre, les échantillons saturés par Na^+, K^+ ou Cs^+ ne contiennent que de l'eau piégée entre les feuillets. Cette eau correspond à la fraction de l'eau adsorbée qui reste emprisonnée dans les espaces interlamellaires au moment de la fermeture des feuillets.

Cette distinction est essentielle, elle permet, comme le font FARMER et RUSSEL (1971), d'aborder certains stades de l'hydratation de l'hectorite saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} ou Ba^{++} en termes de tri ou de monohydrate.

Ces arrangements constituent des états particuliers pour l'eau. L'étude, abordée dans le paragraphe suivant, de l'évolution du spectre infrarouge de l'eau et l'application de la technique de deutération partielle doivent permettre d'en vérifier l'existence et d'en étudier les structures.

2. — IDENTIFICATION ET ÉTUDE PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE DES ÉTATS DE L'EAU AU COURS DE LA DÉSHYDRATATION DU MINÉRAL

L'hectorite a été choisie comme modèle de smectite pour l'étude par spectroscopie infrarouge de l'eau adsorbée sur les argiles. Il s'agit en effet d'un minéral trioctaédrique à substitutions octaédriques où la moitié des groupes OH de constitution du minéral sont remplacés par des atomes de fluor. Ces deux raisons (caractère trioctaédrique et présence de fluor) font que la bande de vibration de valence des groupes OH du réseau ne gêne pas l'examen des bandes de vibration de valence de l'eau adsorbée sur l'argile.

L'utilisation de films orientés a permis l'étude du dichroïsme des bandes d'absorption.

Le spectre infrarouge de l'eau adsorbée sur l'hectorite se distingue nettement du spectre de l'eau liquide par la présence d'une bande supplémentaire résolue à 3 630 cm^{-1}.

Afin de mieux saisir les particularités du spectre de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction des interactions eau-cation compensateur-réseau du minéral, l'étude systématique de l'hectorite saturée par Li^+, Na^+, K^+, Cs^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} a été entreprise. Seuls les spectres les plus caractéristiques sont présentés ici.

A. — *Évolution du spectre d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction de la teneur en eau du minéral*

1. *A la température du spectrographe.*

L'expérience a été réalisée à l'aide du montage représenté par la figure 4 de l'annexe. Ce dispositif permet la prise de poids de l'échantillon au cours même de l'enregistrement, et l'orientation du film dans le faisceau.

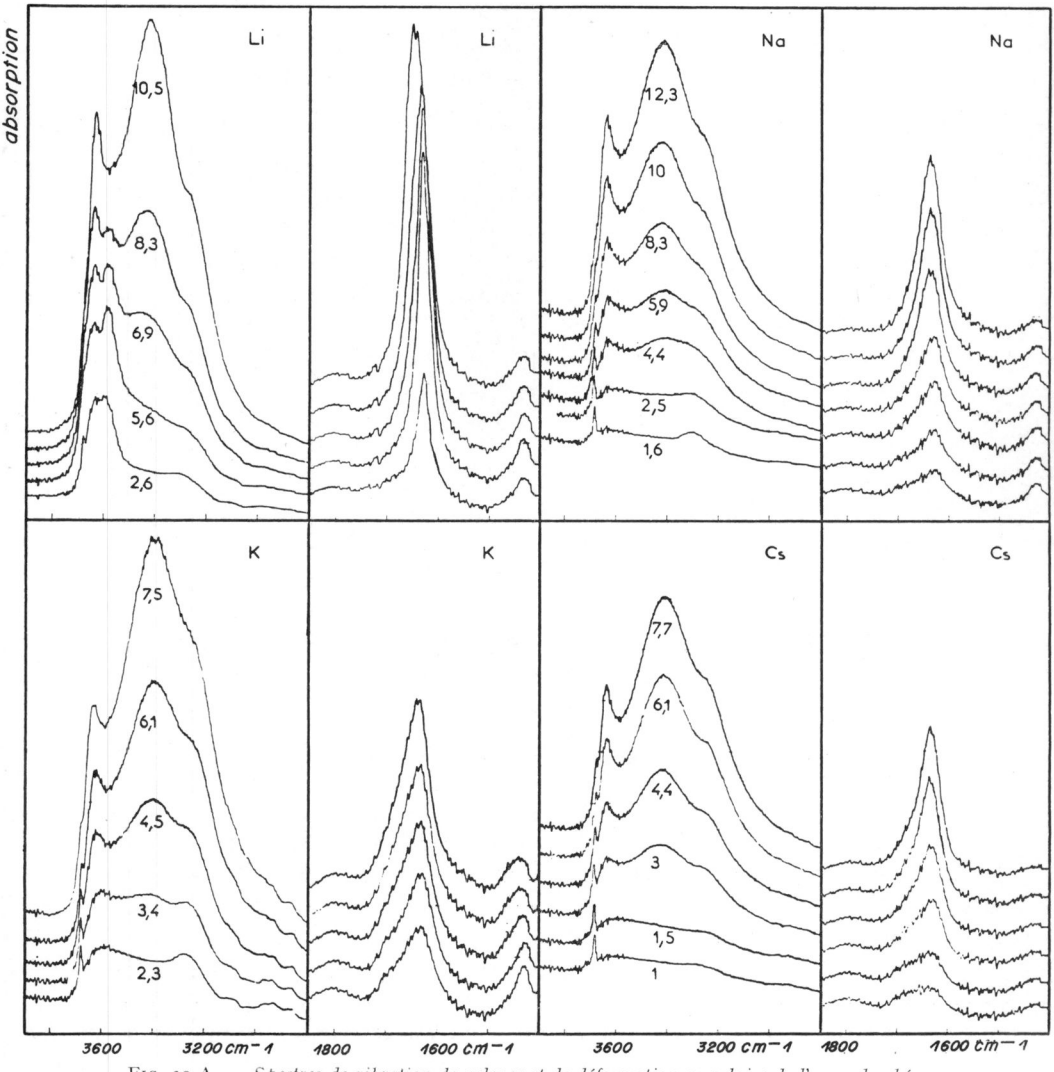


FIG. 30 A. — *Spectres de vibration de valence et de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur l'hectorite saturée par Li^+, Na^+, K^+ et Cs^+*

Les spectres de vibration de déformation angulaire sont placés dans le même ordre que les spectres de vibration de valence. Les chiffres placés sous chacun des maximums d'absorption à 3 400 cm^{-1} indiquent la teneur en eau de l'échantillon. Le spectre le plus déshydraté correspond, pour tous les échantillons, à un chauffage à 200°C pendant 20 minutes sous un vide dynamique de 10^{-2} mm de Hg. Le spectre qui correspond à une teneur en eau immédiatement supérieure a été obtenu lorsque les échantillons sont placés sous un vide dynamique de 10^{-2} mm de Hg à la température du spectrographe.

La figure 30 (A et B) réunit l'ensemble des enregistrements obtenus pour différentes teneurs en eau de l'hectorite saturée par les huit cations étudiés.

Les échantillons hydratés dont la teneur en eau est supérieure à 10 p. 100 ont le même spectre et leur profil est indépendant de la nature du cation compensateur. On observe une bande de vibration de déformation angulaire de l'eau à 1 640 cm^{-1}

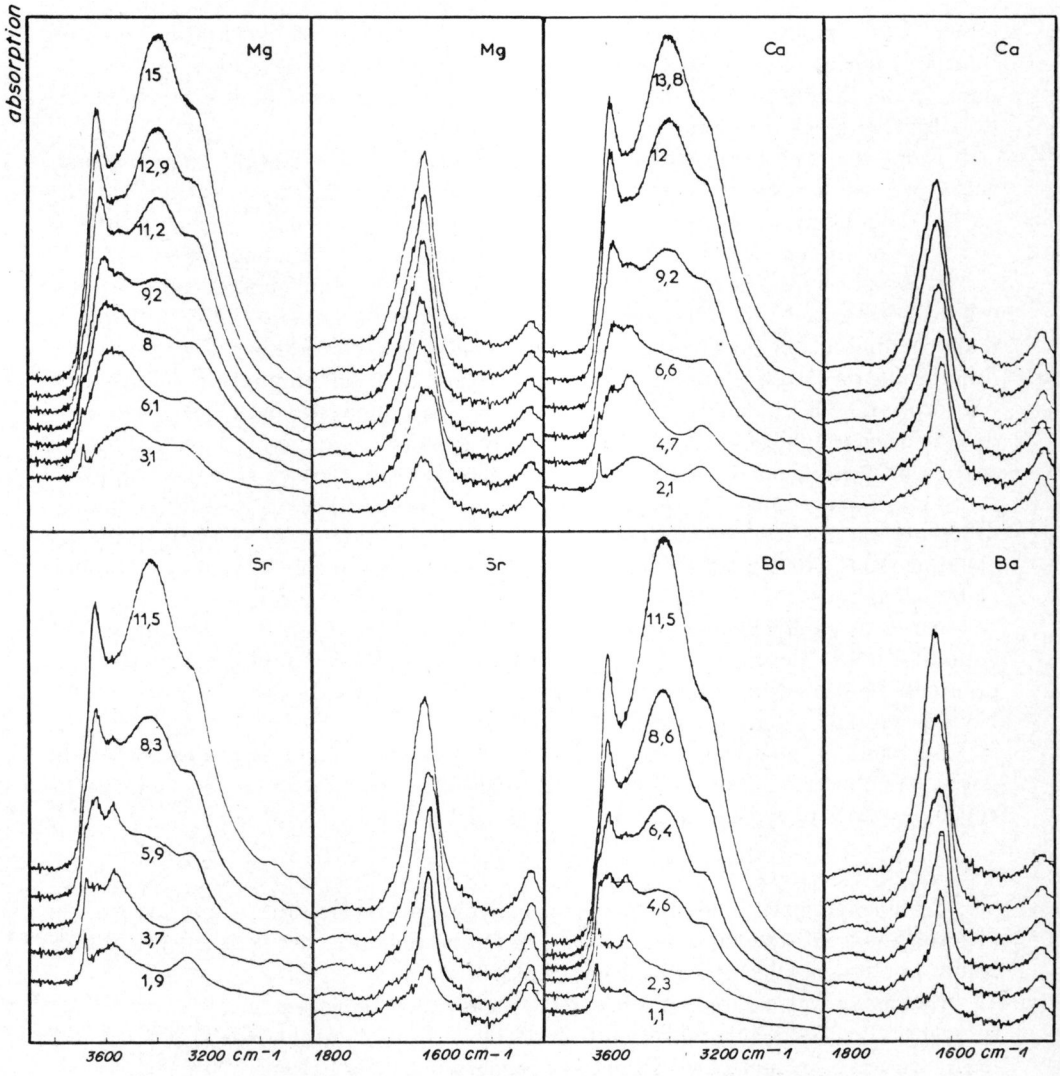


FIG. 30 B. — *Spectres de vibration de valence et de déformation angulaire de l'eau adsorbée sur l'hectorite saturée par Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}*

Les spectres de vibration de déformation angulaire sont placés dans le même ordre que les spectres de vibration de valence. Les chiffres placés sous chacun des maximums d'absorption à 3 400 cm^{-1} indiquent la teneur en eau de l'échantillon. Le spectre le plus déshydraté correspond pour tous les échantillons à un chauffage à 200°C pendant 20 minutes sous un vide dynamique de 10^{-2} mm de Hg. Le spectre qui correspond à une teneur en eau immédiatement supérieure a été obtenu lorsque les échantillons sont placés sous un vide dynamique de 10^{-2} mm de Hg à la température du spectrographe.

et 3 maximums résolus à 3 280-3 420 et 3 630^{-1}, dans la région des vibrations de valence. La bande à 3 630 cm est dichroïque.

L'évolution des spectres au cours de la déshydratation montre qu'il y a toujours une diminution préférentielle de l'absorption à basse fréquence (3 280-3 420 cm^{-1}) par rapport à l'absorption à haute fréquence (3 630 cm^{-1}). Cette diminution sélective de l'absorption permet la résolution de deux bandes à haute fréquence (3 540-3 580 et 3 630-3 640 cm^{-1}) lorsque l'argile est saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}. Ces bandes ne sont résolues que dans un domaine d'hydratation dont les limites changent avec la nature du cation compensateur. Parallèlement, on observe, dans le cas de l'hectorite saturée par ces mêmes cations, la résolution d'une bande de vibration de déformation angulaire à 1 620-1 630 cm^{-1}.

Aux teneurs en eau correspondant à la mise sous vide de l'argile, chaque échantillon présente un spectre caractéristique. En particulier, l'hectorite saturée par Li^+ ou Ba^{++} donne un doublet à 3 575-3 580 et 3 640 cm^{-1} alors que l'hectorite saturée par Ca^{++} donne une bande à 3 560 cm^{-1} et un épaulement à 3 620 cm^{-1}.

L'évolution de la bande de déformation angulaire de l'eau, en particulier, dans le cas de l'hectorite-Li, en fonction de la teneur en eau du minéral, indique qu'il y a d'abord diminution de l'absorption située vers 1 640 cm^{-1} et seulement ensuite, diminution de l'absorption située à 1 625-1 630 cm^{-1}. La diminution sélective de l'absorption et le changement de fréquence du maximum apparent de la bande de déformation angulaire montrent que le spectre est formé d'au moins deux bandes qui marquent la présence de deux types de molécules d'eau sur la surface de l'argile.

La différence entre les spectres de l'eau adsorbée sur l'hectorite saturée par les différents cations, quand les échantillons sont déshydratés par mise sous vide ou chauffage sous vide à 200°C, indique que cette eau est coordonnée aux cations (Russel et Farmer, 1964).

A teneur en eau égale (par exemple 8 p. 100), l'hectorite saturée par chacun des cations étudiés, donne un spectre d'allure distincte. Ceci résulte d'une répartition différente de l'eau à la surface du minéral suivant la nature du cation compensateur. Nous le précisons dans la discussion générale.

La bande à 3 630 cm^{-1} des systèmes hydratés et la bande haute fréquence du doublet (3 630 cm^{-1}) sont dichroïques. Ce dichroïsme traduit un arrangement particulier des molécules d'eau à la surface de l'argile.

2. A — 125°C.

Cette expérience s'est révélée particulièrement intéressante dans les cas où l'hectorite est saturée par Na^+, K^+ ou Cs^+. On ne présente, par conséquent, que les résultats obtenus avec ces trois échantillons.

L'abaissement de température qui entraîne un déplacement vers les basses fréquences des bandes de vibration de valence de l'eau d'autant plus important que les hydroxyles des molécules d'eau sont engagés dans des liaisons hydrogène fortes, permet une meilleure résolution de la partie haute fréquence du spectre (chap. I, B, 2). Le film d'argile destiné à l'expérience est préalablement suspendu au dispositif représenté par la figure 4 de l'annexe, pour déterminer la variation de l'intensité intégrée de la bande de déformation angulaire de l'eau, en fonction de la teneur en eau de l'hectorite. La courbe obtenue sert de courbe d'étalonnage pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon avant qu'il soit refroidi.

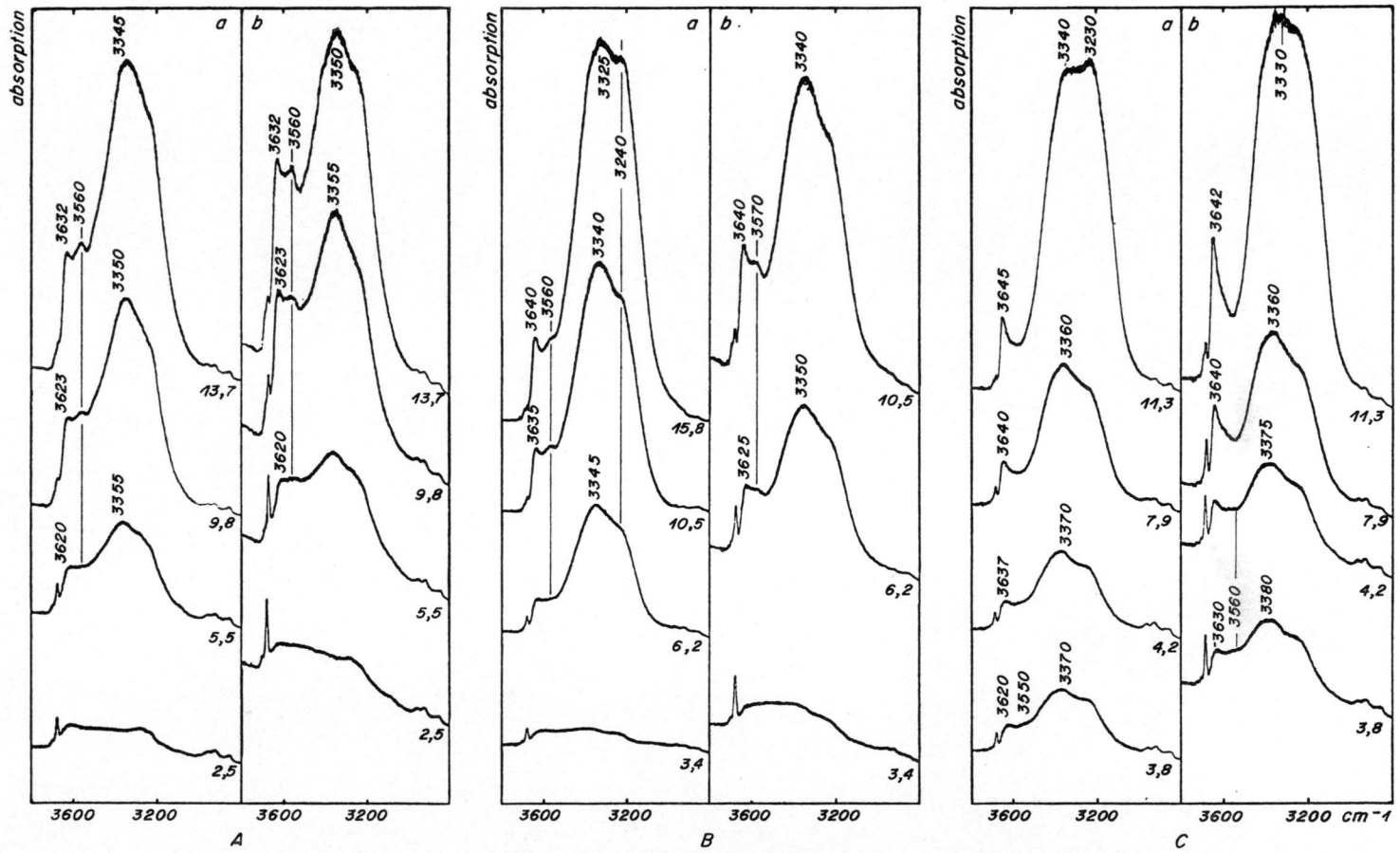


FIG. 31. — *Spectres à — 125°C de l'eau adsorbée sur l'hectorite saturée par* Na^+ (A), K^+ (B), Cs^+ (C)

a et *b* représentent les enregistrements obtenus pour $\alpha = 0$ et 45°.
Les chiffres portés sur chaque courbe indiquent les teneurs en eau

La figure 31 représente les enregistrements obtenus avec l'hectorite saturée par Na^+, K^+ ou Cs^+ et pour des orientations de 0 et 45° du film dans le faisceau.

Le déplacement de la bande à 3 420 cm^{-1} vers 3 340 cm^{-1} permet la résolution d'une bande située vers 3 560 cm^{-1}. Dans le cas de l'hectorite-Cs, cette bande n'est résolue qu'aux teneurs en eau les plus faibles (4 p. 100). Les spectres obtenus pour $\alpha = 0$ et 45° montrent que les bandes à 3 560 et 3 630-3 640 cm^{-1} sont dichroïques.

L'abaissement de température permet de retrouver des caractéristiques spectrales communes à l'ensemble des échantillons étudiés, en particulier, une bande dichroïque vers 3 560 cm^{-1}.

3. *Définition des états de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction de la teneur en eau du minéral.*

L'étude de l'évolution du spectre infrarouge de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction de la teneur en eau du minéral montre qu'il existe plusieurs états pour l'eau. Chacun de ces états est caractérisé par son spectre infrarouge. Le tableau 8

TABLEAU 8

Tableau récapitulatif des états de l'eau dans l'hectorite

Etat de l'eau	Humidité relative (%)	Fréquences de vibration des molécules d'eau en cm^{-1}			
		Nature des cations compensateurs	Déformation	Valence	
I	< 50	Mg^{++}	1 635	3 390	3 635
		Ca^{++}	1 635	3 410	3 637
		Sr^{++}	1 635	3 420	3 637
		Ba^{++}	1 635	3 420	3 630
		Li^+	1 635	3 420	3 630
		Na^+	1 635	3 420	3 630
		K^+	1 635	3 400	3 630
		Cs^+	1 635	3 410	3 640
II	0	Mg^{++}	1 630	3 570	
		Ca^{++}	1 625	3 560	3 620
		Sr^{++}	1 622	3 570	3 640
		Ba^{++}	1 622	3 575	3 640
		Li^+	1 630	3 580	3 640
		Na^+	—	—	
		K^+	—	—	
		Cs^+	—	—	

précise les conditions de déshydratation correspondant à chacun de ces états. On indique pour chacun d'eux les caractéristiques spectroscopiques des molécules d'eau. Il n'existe qu'un seul état pour l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na, K ou Cs.

L'état I est caractérisé par les bandes à 3 400 et 3 630 cm^{-1}, et l'état II par une absorption haute fréquence vers 3 540-3 640 cm^{-1}. Pour certains échantillons (hectorite-Li et Ba), on obtient un doublet ; pour d'autres, on observe seulement un maximum apparent avec un épaulement. C'est ainsi que dans le cas de l'hectorite-Ca, on observe un maximum à 3 560 cm^{-1} et un épaulement à 3 620 cm^{-1}. L'absence de bandes haute fréquence dans le cas de l'hectorite-Na, K ou Cs indique que l'état II n'existe pas pour les molécules d'eau adsorbées sur ces échantillons.

Le comportement spectroscopique des échantillons d'hectorite s'accorde avec les résultats des isothermes d'adsorption d'eau, des courbes d'ouverture et des courbes d'A.T.D. On retrouve le classement des échantillons en deux catégories suivant la nature du cation compensateur. On distingue les échantillons d'hectorite saturée par Li^{+}, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} et ceux saturés par Na^{+}, K^{+} et Cs^{+}.

B. — *Évolution du spectre d'absorption infrarouge du réseau de l'hectorite en fonction de la teneur en eau du minéral*

L'élimination de l'eau adsorbée sur l'hectorite entraîne un déplacement de la bande de vibration de valence des hydroxyles de constitution du minéral de 3690 cm^{-1} vers 3 680 cm^{-1} (fig. 43) et, parallèlement un déplacement de la bande de vibration de déformation de 645 vers 655 cm^{-1} (fig. 32). Il apparaît aussi de profondes modifi-

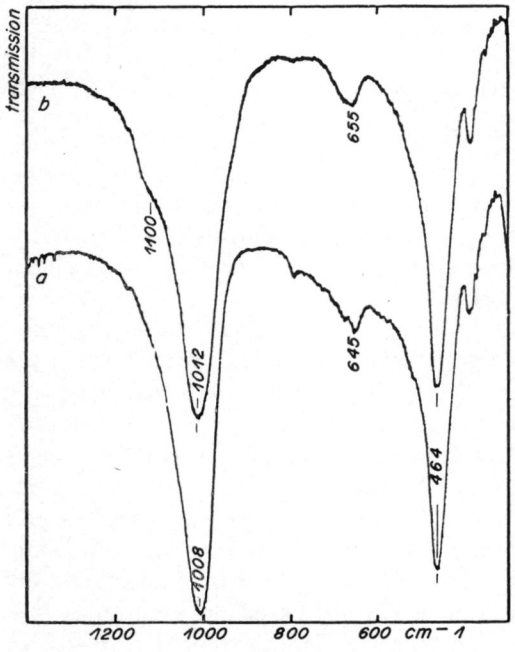


FIG. 32. — *Spectre infrarouge de l'hectorite*
a : séchée à l'air
b : déshydratée par mise sous vide

cations au niveau de la bande des vibrations des groupes Si—O (fig. 32). On note, en particulier, l'apparition sur le système déshydraté par mise sous vide, d'un épaulement vers 1 100 cm^{-1} et le déplacement du maximum apparent de 1 008 à 1 012 cm^{-1}. Ces modifications spectroscopiques sont, sans doute, à relier à des modifications du paramètre *b* identiques à celles observées par Low *et al.* (1971) au cours de l'hydratation de la montmorillonite.

C. — *Étude de la structure et de l'arrangement des molécules d'eau adsorbées sur l'hectorite*

Les expériences présentées dans ce paragraphe ont été conduites afin de déterminer des éléments de la structure de l'eau présente dans le minéral, dans les états successifs où elle se trouve au cours de la déshydratation de l'argile. Elles consistent en la deutération progressive des échantillons maintenus à une teneur en eau constante.

Nous ne présentons que les résultats relatifs à l'hectorite-Na, Li et Ca. L'hectorite-Na est représentative des argiles K et Cs et l'hectorite-Ca des argiles Mg, Sr et Ba. L'hectorite-Li, qui constitue un cas intéressant, se rattache au groupe des argiles saturées par des cations bivalents. Les expériences de deutération progressive ont été faites à deux niveaux d'hydratation différents, correspondant aux deux états de l'eau définis précédemment. Certains enregistrements ont été obtenus à la température du spectrographe (+ 35°C) et d'autres à — 125°C.

α) *Hectorite-Na.*

Les expériences précédentes montrent que l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na est dans le même état quelle que soit la teneur en eau du minéral. Il suffit par conséquent de faire l'étude à une teneur en eau déterminée en vérifiant ensuite que les résultats obtenus restent valables quelle que soit la teneur en eau.

1. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na contenant 17 p. 100 d'eau. État I.*

Cette teneur en eau correspond à la fin du premier palier de la courbe d'ouverture (fig. 28 A). Le contrôle de la teneur en eau est fait par pesée directe de l'échantillon grâce au dispositif représenté par la figure 4 de l'annexe.

La figure 33 représente les spectres correspondant à la deutération progressive de l'hectorite-Na hydratée.

L'examen des bandes de vibration de déformation angulaire des molécules H_2O et de D_2O découplées (spectres *d* et *c* de la fig. 33) n'apportent pas d'indication sur le nombre de types de molécules d'eau. Par contre l'examen des spectres OH ou OD de HOD (spectres *e* et *b* de la fig. 33) montre clairement l'existence de deux types de groupes OH. Les uns qui absorbent à 3 450 et 2 540 cm^{-1} sont engagés dans des liaisons hydrogène ; les autres qui absorbent à 3 620 et 2 660 cm^{-1} contractent des liaisons hydrogène faibles ou nulles. Le dichroïsme de cette bande indique que les groupes OH correspondants sont voisins de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet de l'argile.

Lorsque le taux de substitution de H par D augmente, une bande nouvelle à 2 685-2 690 cm^{-1} se développe. Dans les mêmes conditions la bande à 2 540 cm^{-1} glisse vers 2 515 cm^{-1}. Parallèlement, dans la région OH, lorsque le taux de substitution de H par D diminue, les bandes à 3 450 et 3 620 cm^{-1} se déplacent respectivement vers 3 415 et 3 635 cm^{-1}.

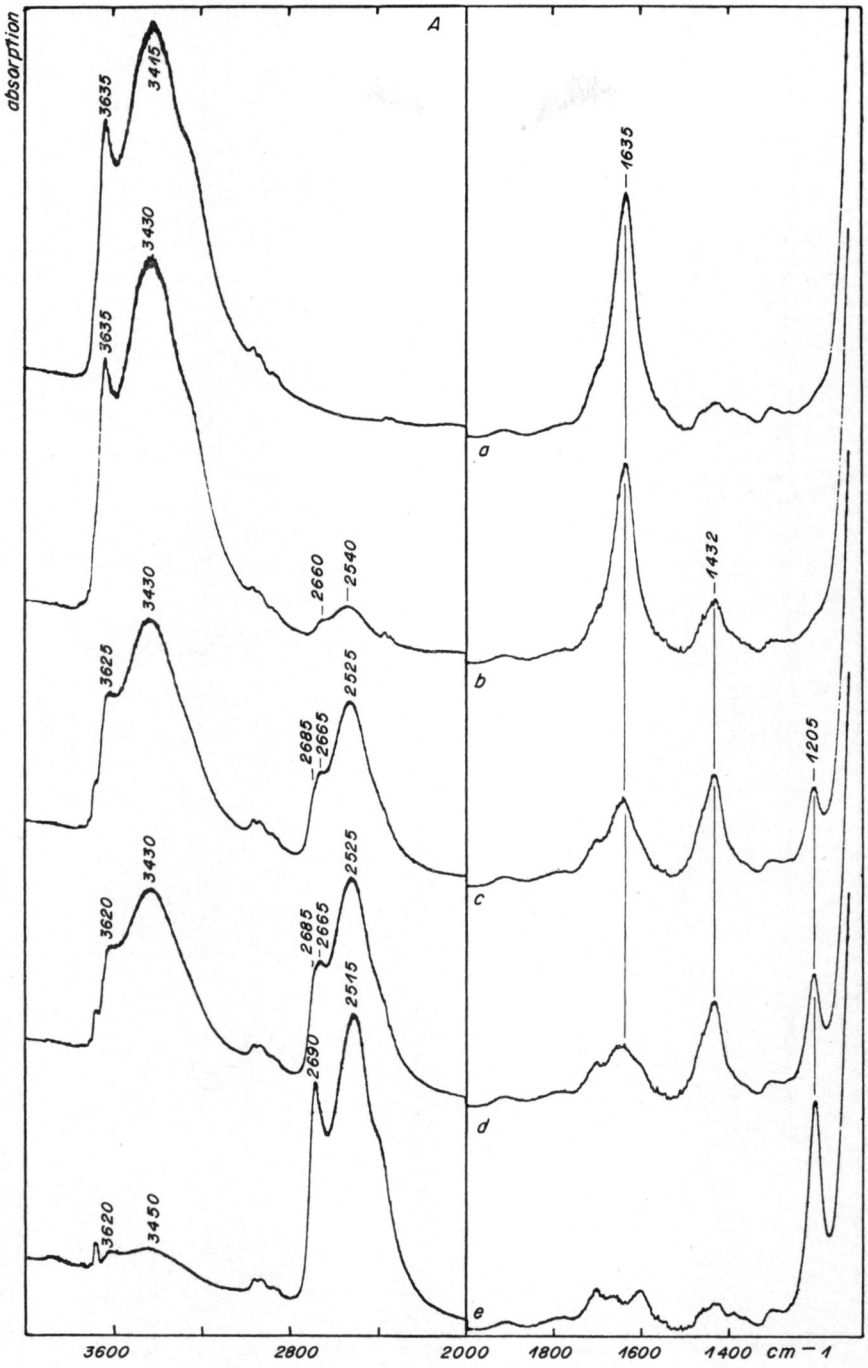


FIG. 33 A. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Na contenant 17 p. 100 d'eau.* $\alpha = 0°$

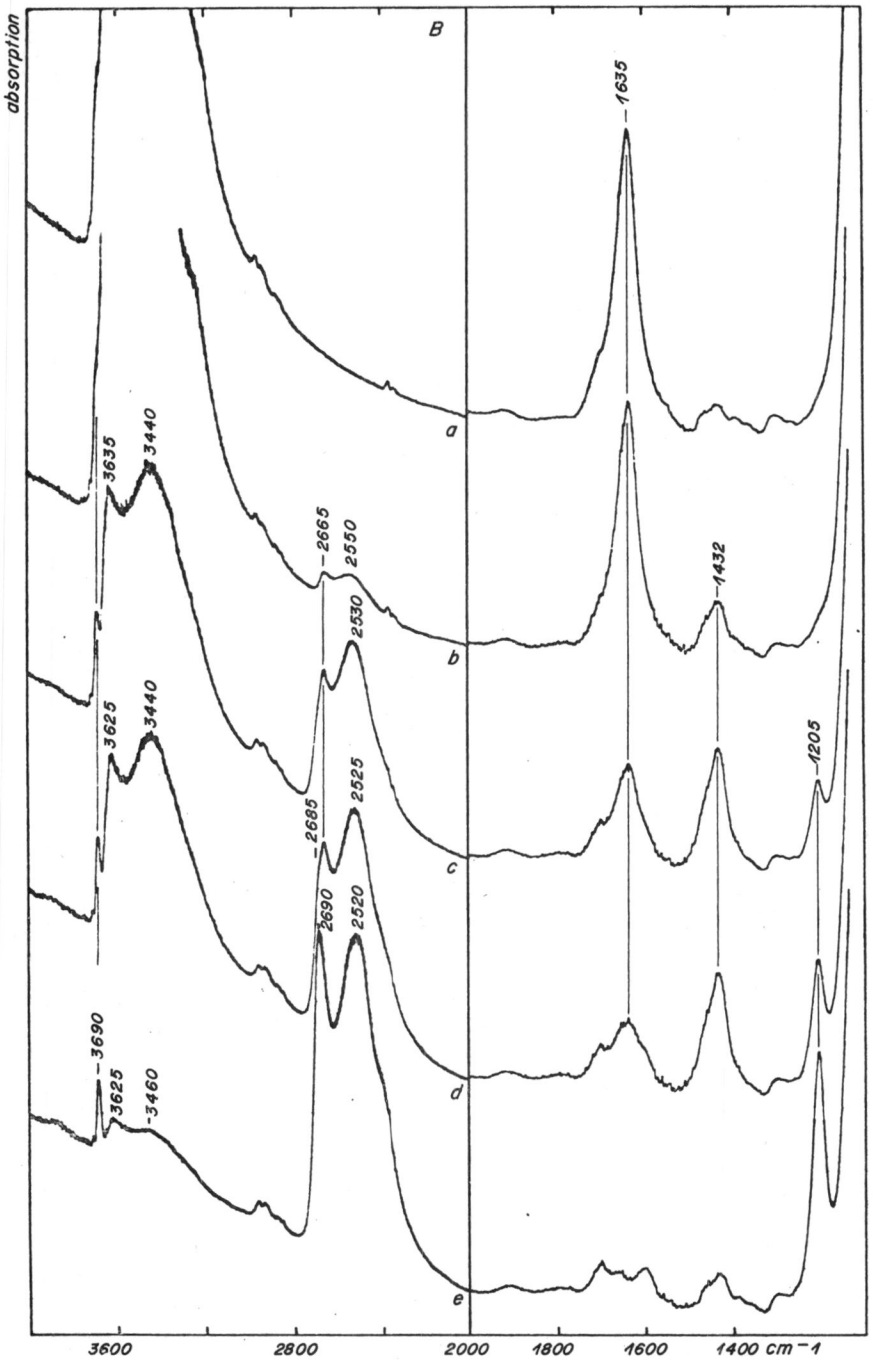


FIG. 33 B. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Na contenant 17 p. 100 d'eau.* $\alpha = 45°$

Enfin le spectre des vibrations de déformation angulaire de HOD est formé d'une bande dont le maximum est à 1 432 cm^{-1}. Il est difficile de préciser si la dissymétrie de cette bande est due au fond ou à la présence de plusieurs bandes de déformation angulaire de HOD.

FARMER et RUSSELL (1971) trouvent les mêmes spectres de vibration de valence des groupes OD de HOD et des molécules de D_2O pour l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na. Ces auteurs expliquent les décalages de fréquence entre les spectres OD de HOD et D_2O sur la base d'un couplage intramoléculaire entre les deux hydroxyles des molécules d'eau qui ont la symétrie C_s, en raison de la formation d'une liaison hydrogène forte par l'intermédiaire d'un de leurs groupes OH, l'autre ne contractant qu'une liaison hydrogène faible ou nulle. Cette interprétation est étayée par la mise en évidence du développement de la bande à 2 685-2 690 cm^{-1}.

Cependant le fait de n'observer qu'une seule bande de vibration de déformation angulaire de HOD met cette interprétation en défaut car la théorie en prévoit deux dans le cas de molécules ayant la symétrie C_s. Par ailleurs, la relation établie précédemment (fig. 24) indique que ces bandes doivent être distantes de 25 cm^{-1} environ, ce qui devrait permettre leur résolution.

Les enregistrements obtenus à basse température des spectres OH de HOD (fig. 34) révèlent la présence de deux bandes à 3 540 et 3 630 cm^{-1} qui sont les homo-

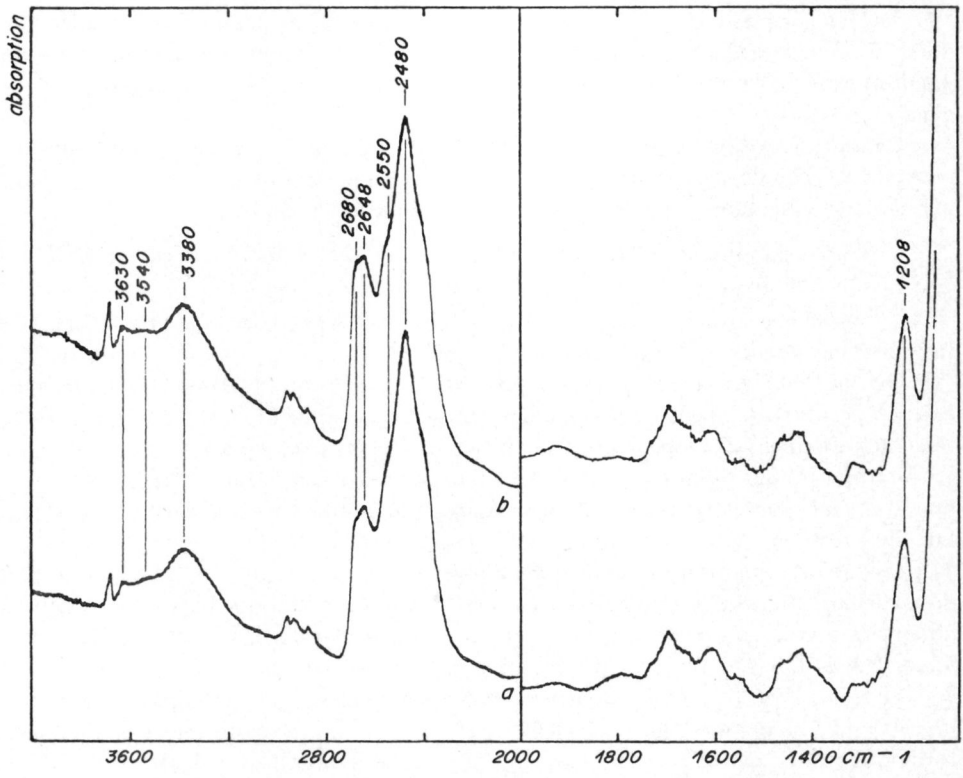


FIG. 34. — *Spectre OH de HOD à — 125°C de l'hectorite-Na conditionnée dans une humidité relative voisine de 50 p. 100*

a et *b* correspondent à $\alpha = 0$ et $\alpha = 30°$

logues de celles à 3 560 et 3 632 cm^{-1} observées sur les systèmes non deutérés (fig. 31). L'existence du même doublet haute fréquence sur le spectre de H_2O et de OH de HOD montre que les bandes à 3 560 et 3 630 cm^{-1} correspondent à des groupes OH de molécules d'eau de symétrie C_s qui ne sont pas engagés dans des liaisons hydrogène.

L'existence d'une bande de vibration de déformation angulaire à une fréquence voisine de 1 640 cm^{-1} indique, en outre, la présence de molécules d'eau qui ont leurs deux hydroxyles engagés dans des liaisons hydrogène. Nous verrons dans la discussion générale que ce type de molécules d'eau existe toujours sur les surfaces externes de l'argile quelque soit la teneur en eau du minéral. Ces molécules d'eau qui ont la symétrie C_{2v} donnent une seule bande de vibration de déformation angulaire de HOD. C'est cette bande, dont la fréquence est voisine de 1 430 cm^{-1}, qui empêche la résolution des deux bandes de déformation angulaire de HOD des molécules d'eau de symétrie C_s.

Il existe, par conséquent, sur la surface de l'hectorite-Na hydratée, deux types de molécules d'eau. Les unes, qui ont la symétrie C_s par suite de la formation d'une liaison hydrogène par l'intermédiaire d'un seul hydroxyle, donnent deux bandes d'absorption vers 3 415 et 3 635 cm^{-1}. Les autres, qui ont la symétrie C_{2v}, parce que leurs deux hydroxyles sont engagés dans des liaisons hydrogène, absorbent dans la région 3 415 cm^{-1}.

L'apparition de deux bandes à 3 540 et 3 630 cm^{-1} sur les spectres de H_2O et de OH de HOD obtenus à basse température montre qu'il existe deux types de molécules d'eau de symétrie C_s. Une partie d'entre elles contracte une liaison hydrogène forte par l'intermédiaire d'un de leurs hydroxyles, l'autre contractant une liaison hydrogène moins forte.

Comme Farmer et Russell (1971) l'ont indiqué, les groupes OH qui ne contractent pas de liaison hydrogène sont dichroïques et ont, par conséquent, leur moment de vibration voisin de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet.

2. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na : évolution du spectre OD de HOD en fonction de la teneur en eau de l'argile.*

L'expérience a été conduite à la température du spectrographe et à — 125°C. Les enregistrements sont présentés sur la figure 35.

Quand la teneur en eau augmente, les bandes des spectres OD de HOD, obtenus à la température du spectrographe, changent peu. La bande à 2 550 cm^{-1}, qui correspond aux groupes OH inclus dans des liaisons hydrogène, se déplace vers 2 520 cm^{-1}, et son intensité par rapport à la bande à 2 660 cm^{-1} augmente. La bande à 2 660 cm^{-1} ne varie pratiquement pas. A base température, la bande correspondant aux groupes OH liés reste à 2 490 cm^{-1} tant que la teneur en eau de l'argile ne dépasse pas 12 p. 100. Seule son intensité croît quand la teneur en eau augmente. Le déplacement de cette bande vers les basses fréquences permet la résolution d'une bande à 2 605 cm^{-1} lorsque la teneur en eau de l'argile est comprise entre 9 et 12 p. 100. La bande à plus haute fréquence se déplace continûment de 2 650 cm^{-1} à 2 680 cm^{-1}.

Le spectre OD de HOD qui correspond à une teneur en eau de l'argile de 12 p. 100 (fig. 35) est l'homologue du spectre OH de HOD de la figure 34, obtenu avec de l'hectorite-Na contenant 12 p. 100 d'eau. Le rapport de deutération calculé à partir des fréquences OH et OD de HOD est de 1,36. Les bandes à 2 605 et 2 670 cm^{-1} sont dichroïques comme leurs homologues à 3 540 et 3 630 cm^{-1}. La présence de ces deux

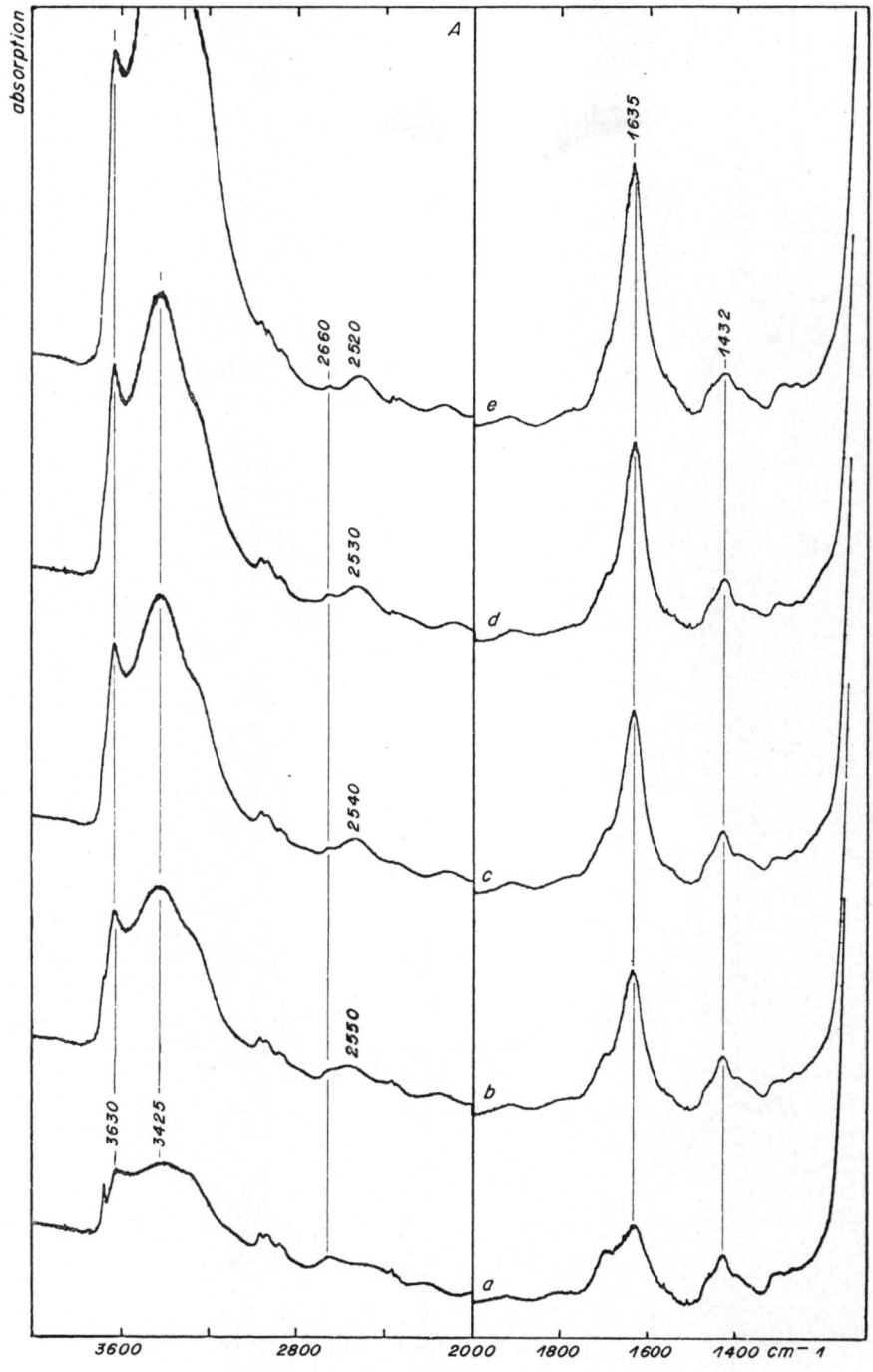


FIG. 35 A. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* correspondent respectivement à 6-9-11-12 et 18 p. 100 d'eau. $\alpha = 0^0$

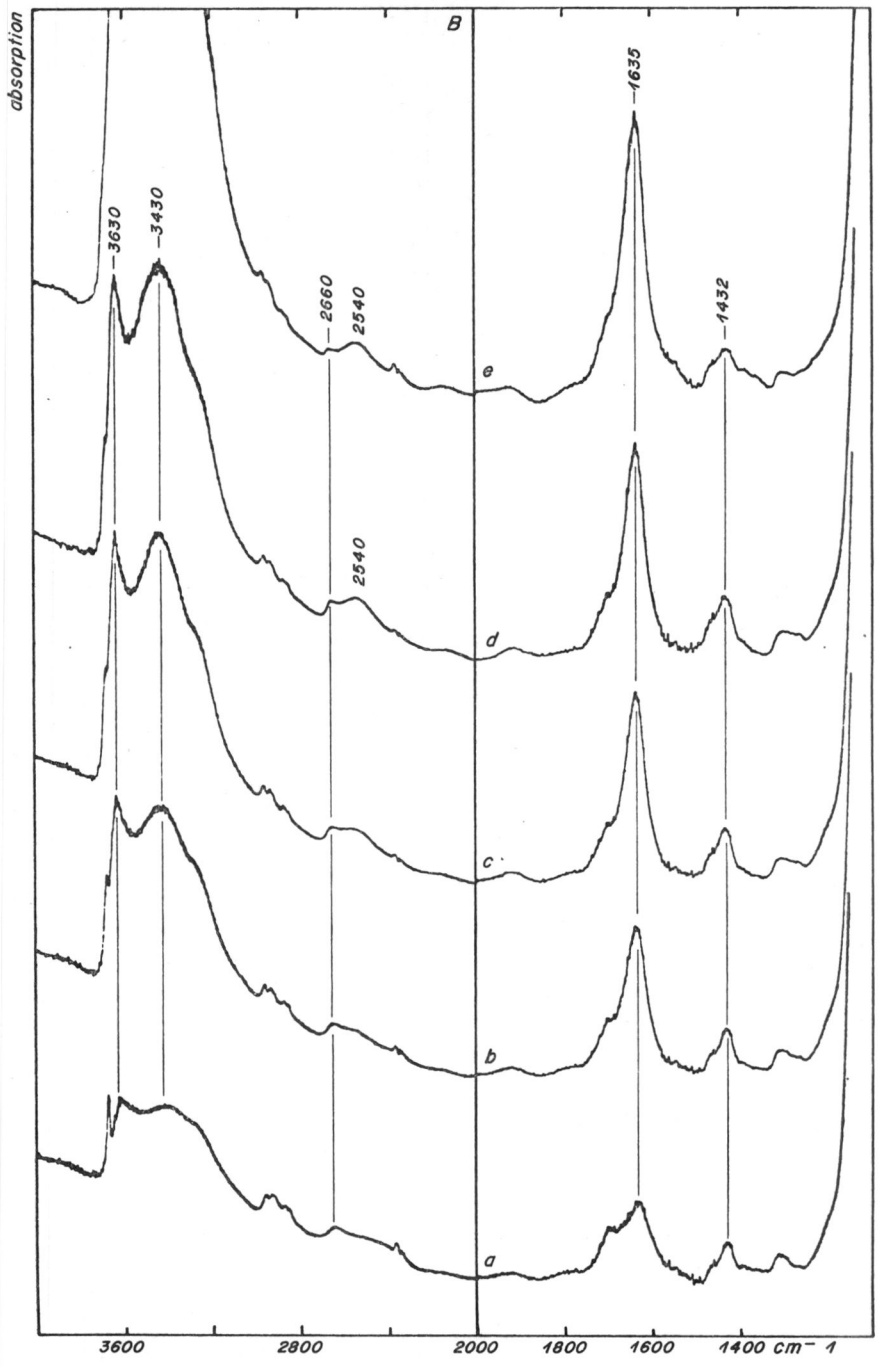


FIG. 35 B. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* correspondent respectivement à 6-9-11-12 et 18 p. 100 d'eau. $\alpha = 30^{\circ}$

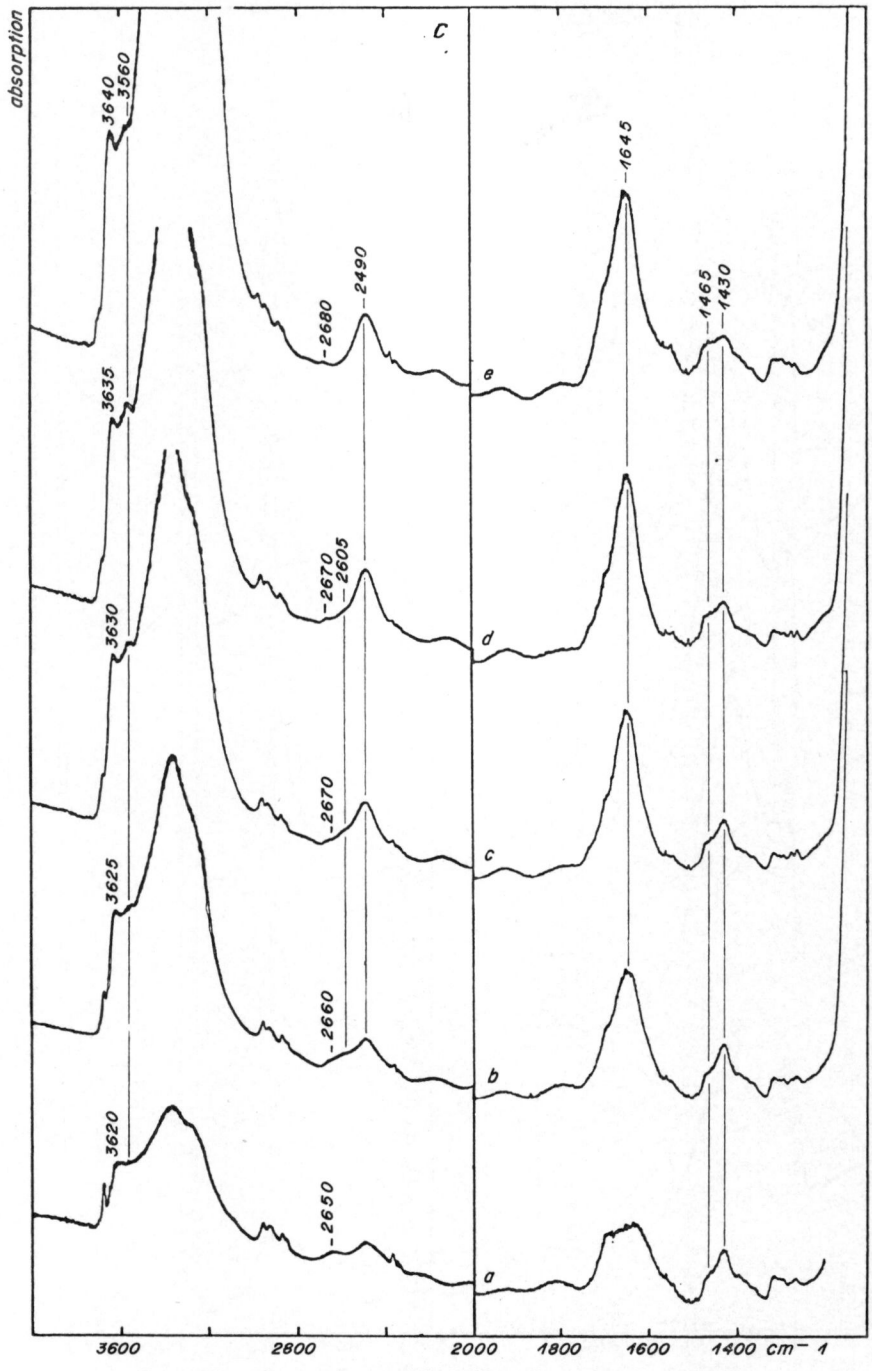


FIG. 35 C. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* obtenus à — 125°C correspondent respectivement à 6-9-11-12 et 18 p. 100 d'eau. $\alpha = 0°$

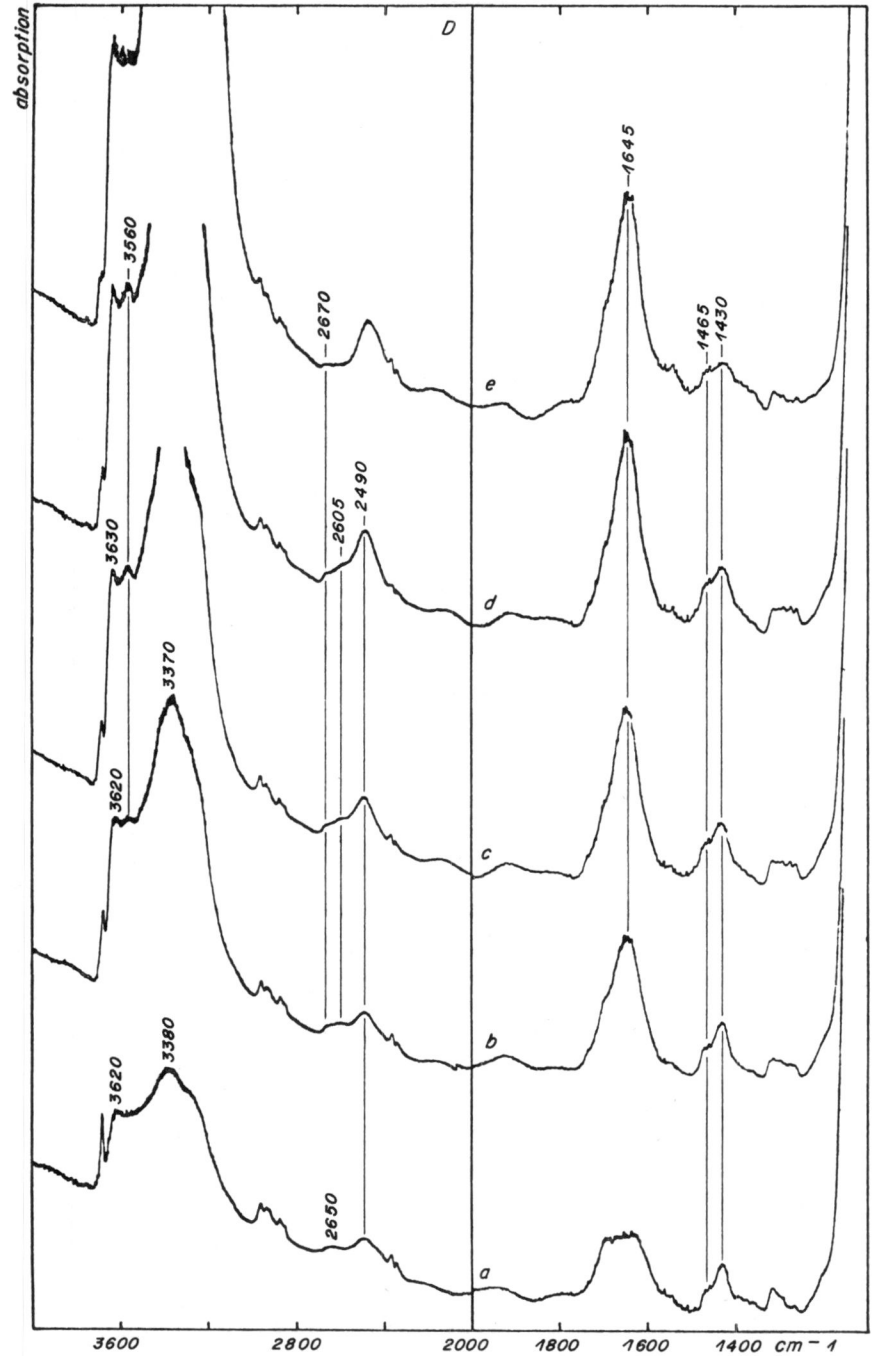


FIG. 35 D. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* obtenus à — 125°C correspondent respectivement à 6-9-11-12 et 18 p. 100 d'eau. $\alpha = 30^{\circ}$

bandes haute fréquence sur les systèmes OH et OD de HOD ou H_2O confirme l'existence de deux types de molécules d'eau qui ont la symétrie C_s.

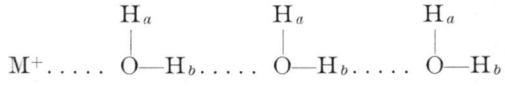
La disparition de la bande à 2 605 cm^{-1}, quand la teneur en eau atteint 18 p. 100, résulte d'un changement dans l'arrangement des molécules d'eau. Il n'y a plus dans ces conditions d'hydratation qu'un seul type de molécules d'eau de symétrie C_s.

Le déplacement de la bande basse fréquence, lorsque la teneur en eau augmente, de 2 550 à 2 520 cm^{-1} sur les spectres OD de HOD obtenus à la température du spectrographe, indique l'apparition de groupes OH inclus dans des liaisons hydrogène de plus en plus fortes.

3. *Conclusion de l'étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na.*

Le modèle proposé par FARMER et RUSSELL (1971) dans le cas de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Na rend compte de l'existence de molécules d'eau de symétrie C_s.

On a en effet :



Ce modèle permet, de plus, l'individualisation des deux types de molécules d'eau de symétrie C_s : celles qui appartiennent à la première sphère d'hydratation du cation et celles qui en sont éloignées.

L'effet polarisant du cation entraîne, le renforcement de la liaison hydrogène $O—H_b \ldots\ldots O$ et par conséquent un abaissement de fréquence des bandes de vibration de valence correspondantes (ZUNDEL, 1969). Par ailleurs l'abaissement de fréquence de l'hydroxyle qui est inclus dans une liaison hydrogène s'accompagne d'un abaissement de la fréquence de l'hydroxyle qui ne contracte pas de liaison hydrogène (SAUMAGNE, 1970 ; BELLAMY *et al.*, 1971).

Les enregistrements obtenus à — 125°C s'interprètent alors de la manière suivante :

— la bande à 3 540 cm^{-1} et son homologue à 2 605 cm^{-1} sont dues aux groupes OH_a des molécules d'eau de symétrie C_s qui appartiennent à la première sphère d'hydratation ;

— la bande à 3 630 cm^{-1} et son homologue à 2 670 cm^{-1} étant dues aux groupes OH_a des molécules d'eau de symétrie C_s qui n'appartiennent pas à la première sphère d'hydratation.

Les groupes OH_b, engagés dans des liaisons hydrogène absorbent vers 3 400 cm^{-1} (2 500 cm^{-1} dans la région OD). La direction des groupes OH_a est voisine de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet.

β) *Hectorite-Li.*

1. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li contenant 16 p. 100 d'eau. État I.*

Cette teneur en eau correspond à la fin du premier palier des courbes d'ouverture (fig. 28 A). Le contrôle de la teneur en eau est fait par pesée directe de l'échantillon grâce au dispositif représenté par la figure 4 de l'annexe.

La figure 36 représente les spectres correspondant à la deutération progressive de l'hectorite-Li hydratée.

Les résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus avec l'hectorite-Na. Il y a en particulier deux bandes OH ou OD de HOD (spectres *e* et *b* de la figure 36)

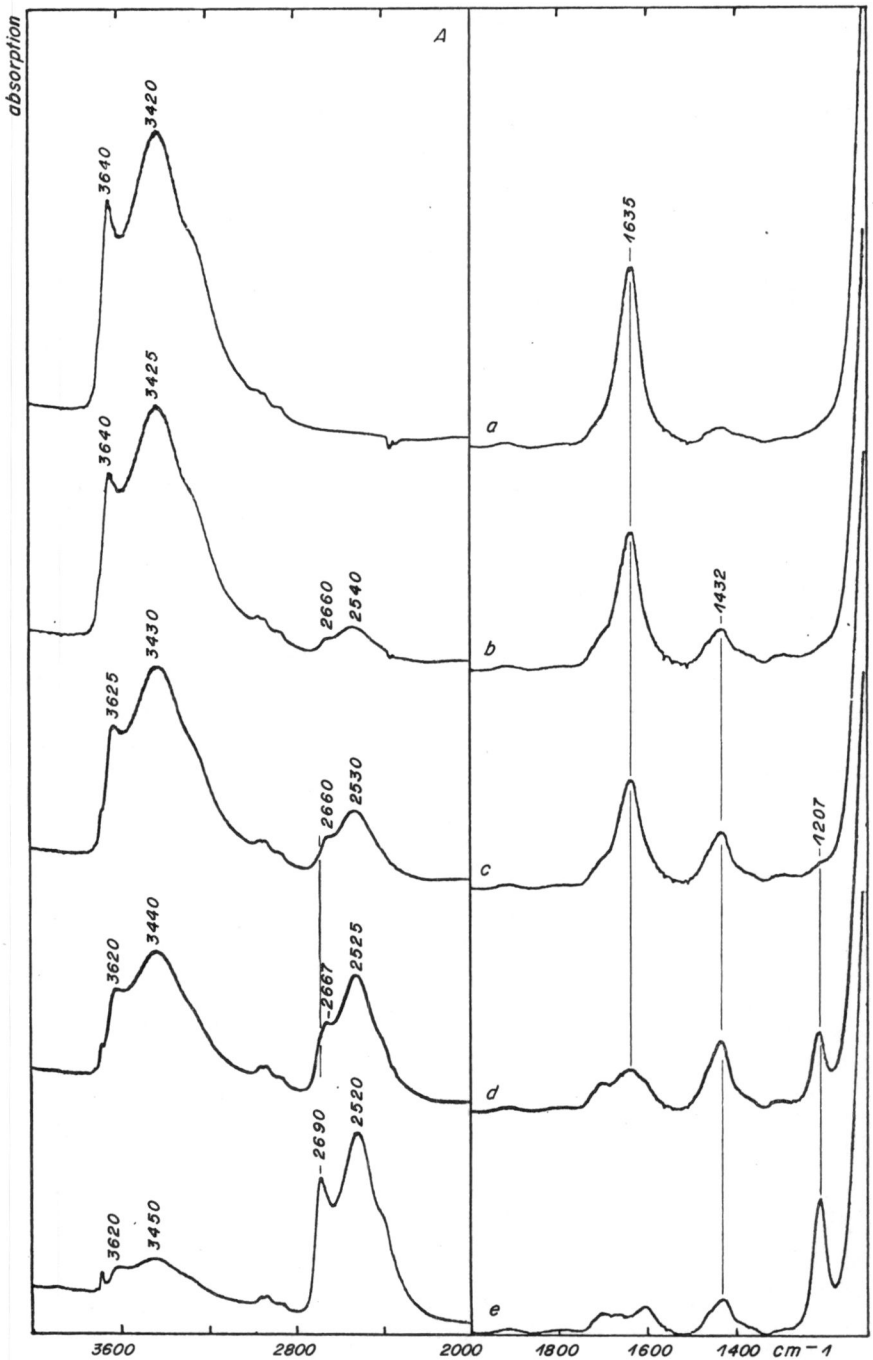


FIG. 36 A. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Li contenant 16 p. 100 d'eau.* $\alpha = 0^{\circ}$

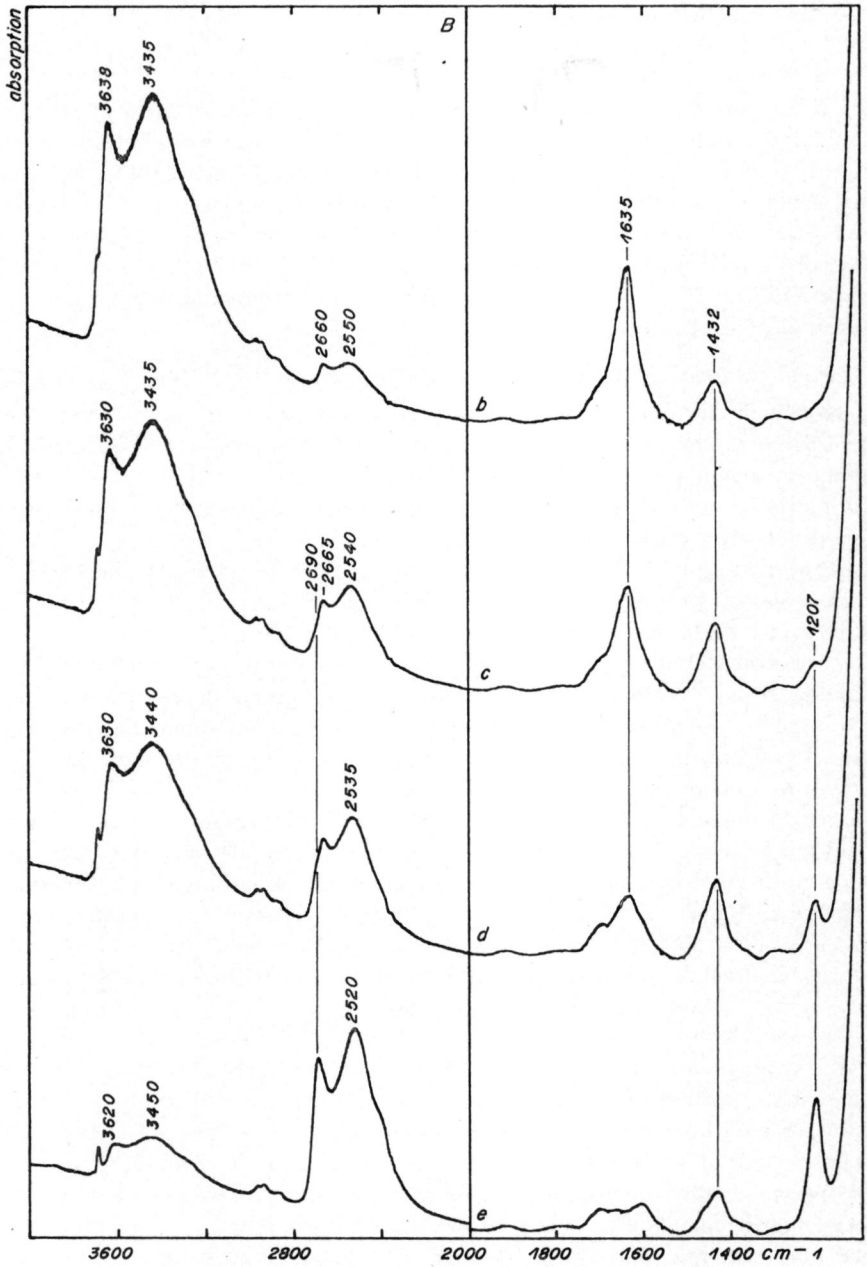


FIG. 36 B. — *Deutération progressive* (spectres *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Li contenant 16 p. 100 d'eau.* $\alpha = 45°$

qui correspondent à deux types de groupes OH. Les uns qui absorbent à 3 450 et 2 540 cm^{-1} sont engagés dans des liaisons hydrogène, les autres qui absorbent à 3 620 et 2 660 cm^{-1} contractent des liaisons hydrogène faibles ou nulles. La bande à 3 620-2 660 cm^{-1} est dichroïque ce qui implique que les groupes OH correspondants soient voisins de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet de l'argile.

De même que pour l'hectorite-Na, lorsque le taux de substitution de H par D augmente, une bande nouvelle à 2 690 cm^{-1} se développe. Dans les mêmes conditions, la bande à 2 540 cm^{-1} glisse vers 2 520 cm^{-1}. On note parallèlement dans la région OH, lorsque le taux de substitution de H par D diminue, le déplacement des bandes à 3 450 et 3 620 cm^{-1}, respectivement vers 3 420 et 3 640 cm^{-1}.

La très grande analogie de comportement entre l'hectorite-Li et l'hectorite-Na contenant environ 16 p. 100 d'eau résulte probablement d'arrangements identiques pour les molécules d'eau adsorbées.

2. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li contenant 5 p. 100 d'eau. État II.*

Cette teneur en eau est obtenue en plaçant l'échantillon sous un vide de 10^{-2} mm de Hg. Elle correspond à une valeur de d_{001} de 12 Å. Les résultats de spectroscopie infrarouge montrent qu'il s'agit d'eau de solvatation des cations Li^+.

La figure 37 représente les enregistrements correspondant à la deutération progressive de l'hectorite-Li contenant 5 p. 100 d'eau.

Les spectres de vibration de déformation angulaire des molécules de H_2O et de D_2O découplées sont formés d'une seule bande, respectivement à 1 630 et 1 202 cm^{-1} (spectres *d* et *c* de la fig. 37).

Les spectres OH et OD de HOD (spectres *e* et *b* de la fig. 37) sont formés d'une seule bande, respectivement à 3 610 et 2 660 cm^{-1}. Le spectre de vibration de déformation angulaire est formé d'une seule bande à 1 432 cm^{-1}. L'application du tableau 2 au cas de l'hectorite-Li contenant 5 p. 100 d'eau montre que les molécules d'eau sont identiques et qu'elles ont la symétrie C_{2v}.

Le rétablissement des couplages intramoléculaires par augmentation du taux de substitution de H par D fait apparaître deux épaulements de part et d'autre de la bande de vibration de valence de OD de HOD qui donnent les bandes à 2 620 et 2 705 cm^{-1} sur les systèmes complètement deutérés. Cette évolution est caractéristique de molécules C_{2v} (Bellamy *et al.*, 1971). Les bandes à 3 580 et 3 640 cm^{-1} correspondent aux vibrations fondamentales de la molécule d'eau. Les résultats obtenus pour l'eau mélangée à des solvants organiques (Greinacher *et al.*, 1955 ; Saumagne et Josien, 1958 ; Saumagne, 1970 ; Bellamy *et al.*, 1971) ou associée à des sels (Fifer et Schiffer, 1971) montrent que la bande à plus haute fréquence (3 640 cm^{-1}) doit être attribuée aux vibrations antisymétriques des molécules d'eau adsorbées.

La valeur de la fréquence de vibration de valence des groupes OH de HOD (3 610 cm^{-1}) indique qu'il s'agit de molécules d'eau qui ne contractent pas de liaisons hydrogène. Nous reprendrons ce dernier point dans la discussion générale.

Les enregistrements effectués pour des orientations de 0 et 45° du film dans le faisceau montrent que la bande à 3 640 cm^{-1} et son homologue à 2 705 cm^{-1} sont dichroïques, de même que les bandes de vibration de valence de OH et OD de HOD.

Le dichroïsme de la vibration antisymétrique de l'eau implique que le moment de vibration correspondant soit dressé sur le plan (*a*, *b*) du feuillet. L'application de la formule développée au chapitre I-B pour le calcul de l'angle du moment de vibration

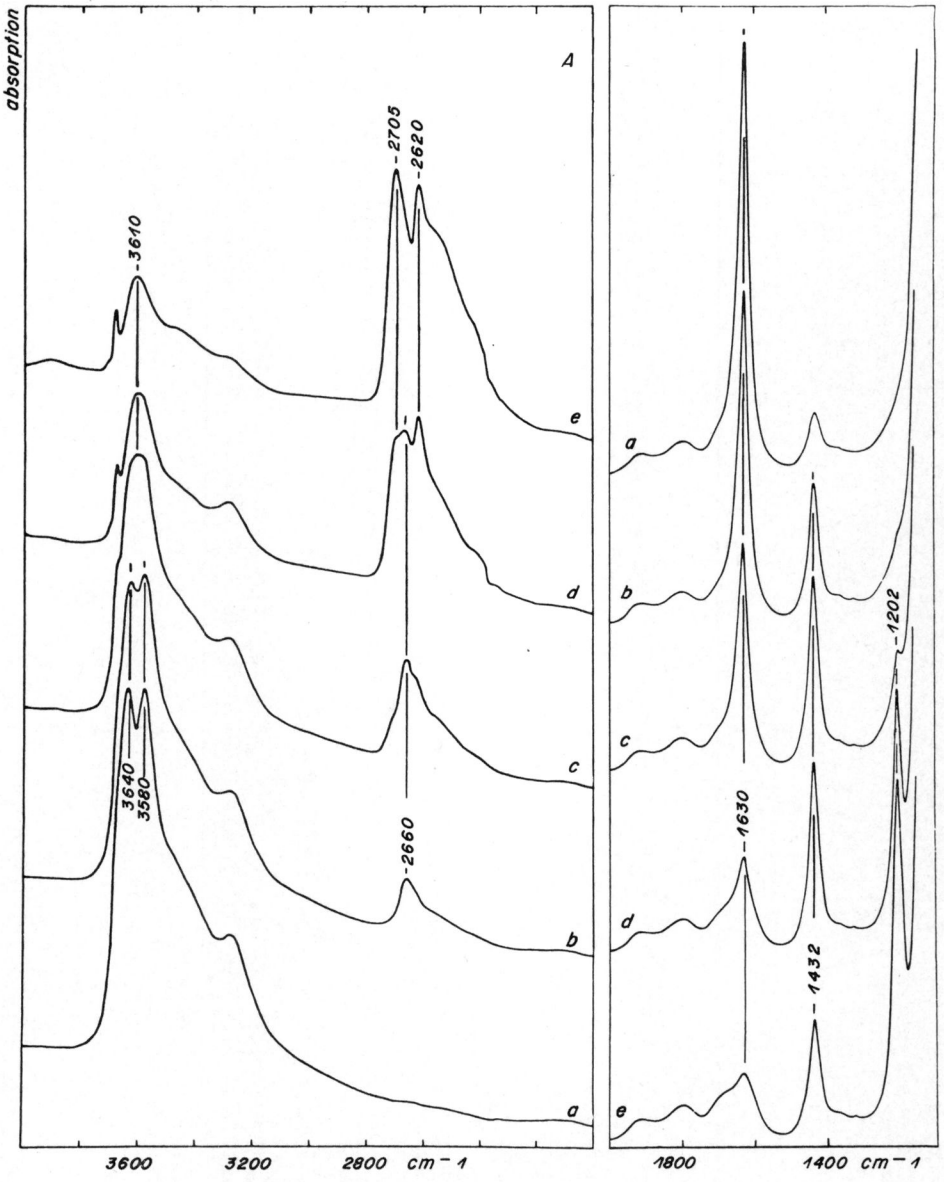


FIG. 37 A. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Li déshydratée par mise sous vide.* $\alpha = 0°$

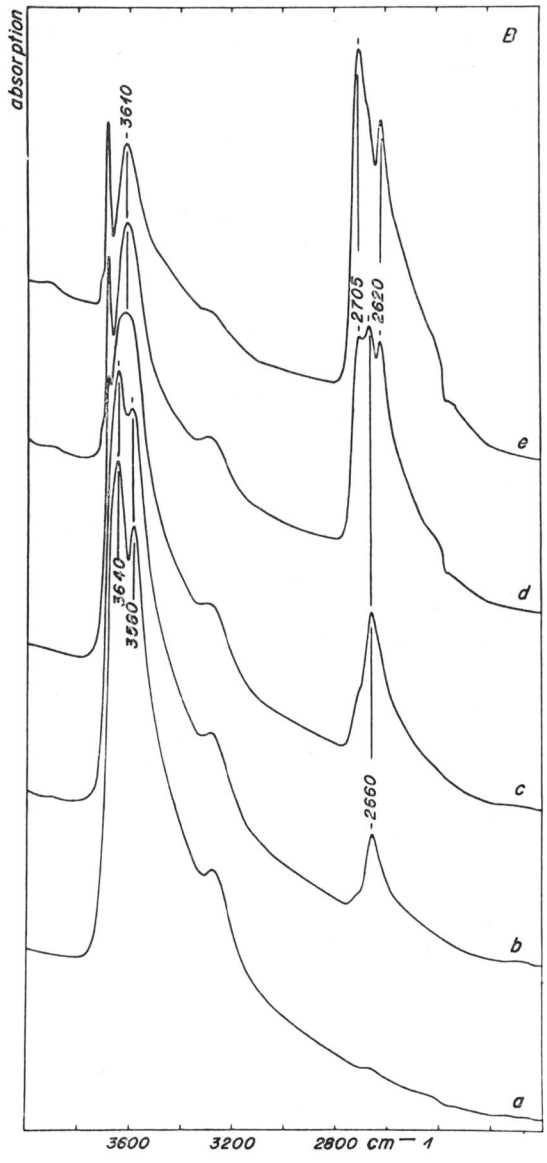


FIG. 37 B. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*) *de l'hectorite-Li déshydratée par mise sous vide.* $\alpha = 45°$

des groupes OH de HOD et des groupes OH de constitution du minéral avec le plan (*a*, *b*) du feuillet, donne respectivement 65 et 68°. Dans le cas des groupes OH de constitution du minéral, nous aurions dû trouver une valeur voisine de 90°. L'écart est dû au fait que les plaquettes d'argile qui constituent le film ne sont pas rigoureusement parallèles au plan du support. Ceci est bien mis en évidence par l'examen au microscope électronique d'une coupe de dépôt orienté d'hectorite (TCHOUBAR *et al.*, 1973). Ce calcul montre que les groupes OH de HOD ont la même orientation que les groupes OH de constitution du minéral. Ils sont par conséquent voisins de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet. FARMER et RUSSELL (1971) trouvent la même orientation pour les groupes OH de HOD dans l'hectorite-Na et Mg.

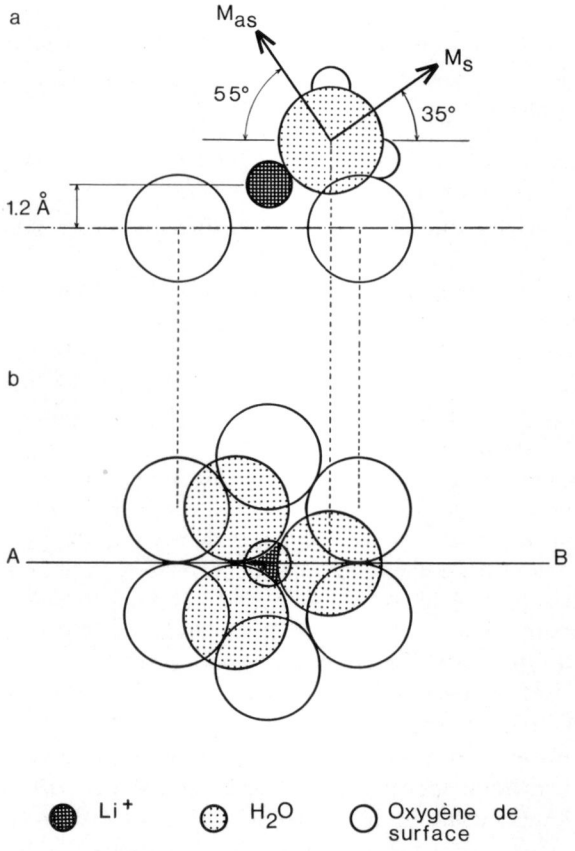


FIG. 38. — *Orientation de la molécule d'eau par rapport au cation Li^+ et aux atomes d'oxygène de la surface*

a : vue de côté : coupe suivant AB
b : vue de dessus.

La figure 38 représente le modèle que nous proposons pour l'arrangement des molécules d'eau de solvatation des cations Li^+ sur l'hectorite contenant 5 p. 100 d'eau. Nous admettons que le cation est sur l'axe de la cavité hexagonale et que la direction cation-eau est confondue avec l'axe de symétrie de la molécule d'eau qui, dans ces

conditions, a ses deux orbitales libres dirigées vers le cation. Les moments de vibration symétrique et antisymétrique font respectivement 35 et 55° avec le plan (*a*, *b*) du feuillet. Cette différence est suffisante pour expliquer le caractère dichroïque plus marqué de la bande de vibration de valence antisymétrique par rapport à la bande de vibration de valence symétrique (Chap. I-B). Cette configuration rend compte de l'existence de groupes OH perpendiculaires au plan (*a*, *b*) du feuillet.

La valeur de l'espacement d_{001} qui est de 12 Å, ainsi que le nombre moyen de molécules d'eau qui solvatent les cations, lequel est voisin de 3, suggèrent la formation de trihydrates. Les trois molécules d'eau du trihydrate occupent trois des sommets d'une pyramide dont le quatrième est occupé par le cation Li^+. Cet arrangement amène le cation Li^+ à la cote de 1,2 Å prise par rapport au plan des atomes d'oxygène de surface (1).

Le schéma que nous proposons pour l'orientation de la molécule d'eau par rapport au cation compensateur et par rapport au feuillet est voisin de celui déterminé théoriquement par CALVET (1973).

3. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li : évolution du spectre OD de HOD en fonction de la teneur en eau de l'argile.*

L'expérience a été conduite à la température du spectrographe et à — 125°C. Les enregistrements sont présentés sur la figure 39.

A la température du spectrographe, lorsque l'argile contient 6 p. 100 d'eau, on obtient le doublet à 3 580-3 630 cm^{-1}, caractéristique de l'eau de solvatation des cations Li^+. Le spectre OD de HOD est alors formé d'une bande à 2 660 cm^{-1}. Ces bandes restent aux mêmes fréquences lorsque l'échantillon est refroidi à — 125°C. C'est une conséquence du fait que les groupes OH correspondants ne contractent pas de liaison hydrogène.

Au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, une bande basse fréquence se développe dont la fréquence passe de 2 550 à 2 530 cm^{-1} pour les enregistrements obtenus à la température du spectrographe, et de 2 520 à 2 465 cm^{-1} pour ceux obtenus à — 125°C. On note de même un léger déplacement de la bande haute fréquence qui passe, sur les spectres obtenus à — 125°C, de 2 650 à 2 680 cm^{-1}.

Dans le domaine des vibrations de valence OH, le doublet haute fréquence disparaît sur le spectre de l'hectorite-Li obtenu à — 125°C et contenant 9 p. 100 d'eau. C'est seulement lorsque l'échantillon contient 13 p. 100 d'eau qu'apparaît une nouvelle bande haute fréquence à 3 520 cm^{-1}. La disparition du doublet à 3 580-3 630 cm^{-1} sur le spectre de l'argile contenant 9 p. 100 d'eau, implique la perturbation des molécules d'eau de solvatation des cations Li^+, par les nouvelles molécules d'eau adsorbées.

On retrouve une évolution du spectre de H_2O et de OD de HOD à basse température (fig. 39), pour des teneurs en eau supérieures à celles où on détecte le doublet à 3 580-3 630 cm^{-1}, identique à celle que nous avons obtenue avec l'hectorite-Na. Le déplacement de la bande de 3 540 observée sur l'hectorite-Na, à 3 520 cm^{-1}, sur le spectre de vibration de valence de H_2O de l'hectorite-Li, explique que son homologue sur le spectre OD de HOD, ne soit pas résolue.

(1) Nous signalons que les résultats de la deutération progressive, obtenus dans le cas de la montmorillonite-Li déshydratée par mise sous vide, sont identiques à ceux que nous venons de décrire pour l'hectorite-Li. En outre, PEZERAT et MÉRING (1967) trouvent, à partir de mesures de diffraction des RX, que la cote du cation Na^+ de la montmorillonite à l'état monocouche est de 0,95 Å.

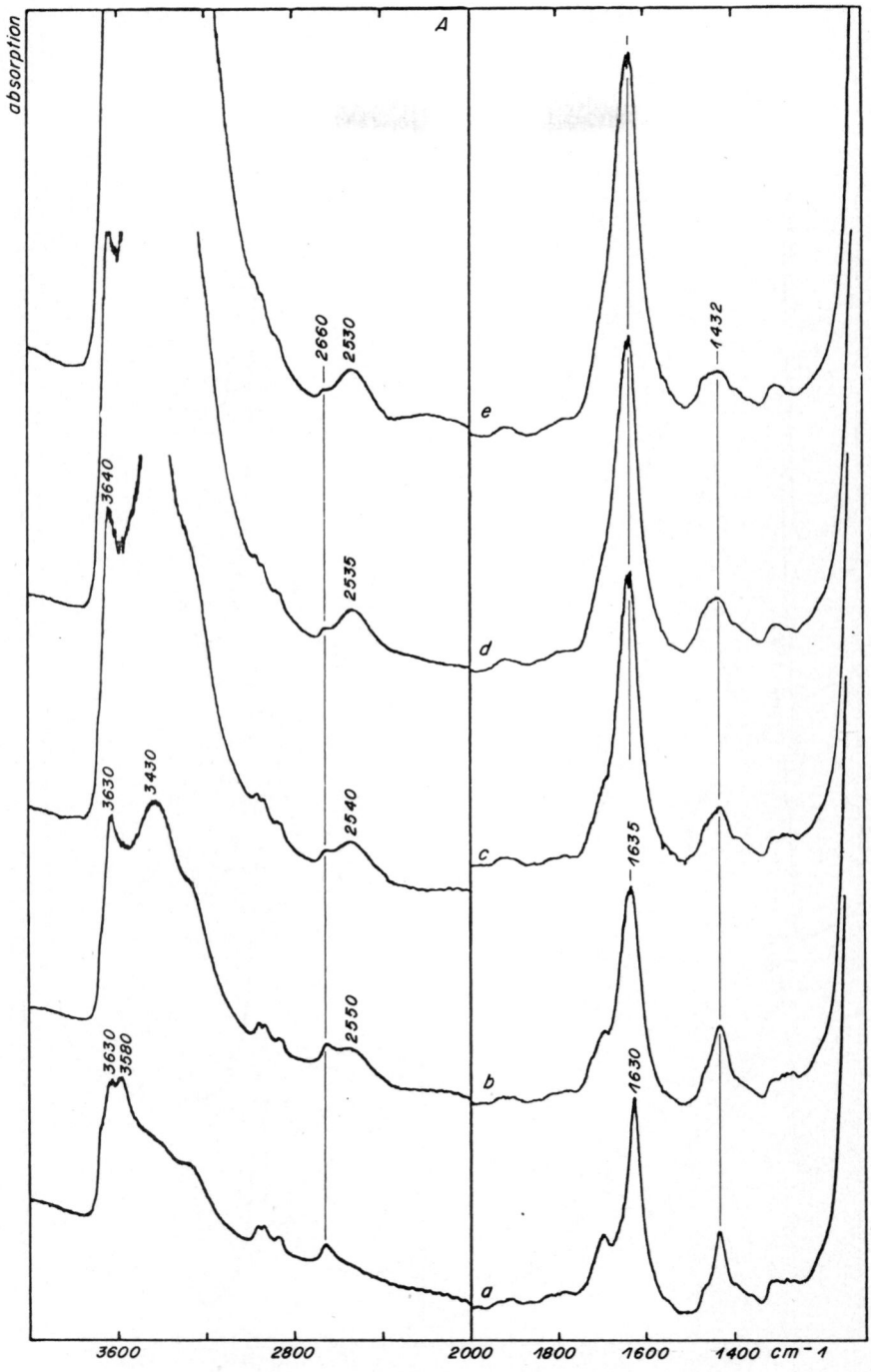


FIG. 39 A. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* correspondent respectivement à 6-9-13-16 et 20 p. 100 d'eau. $\alpha = 0^{0}$

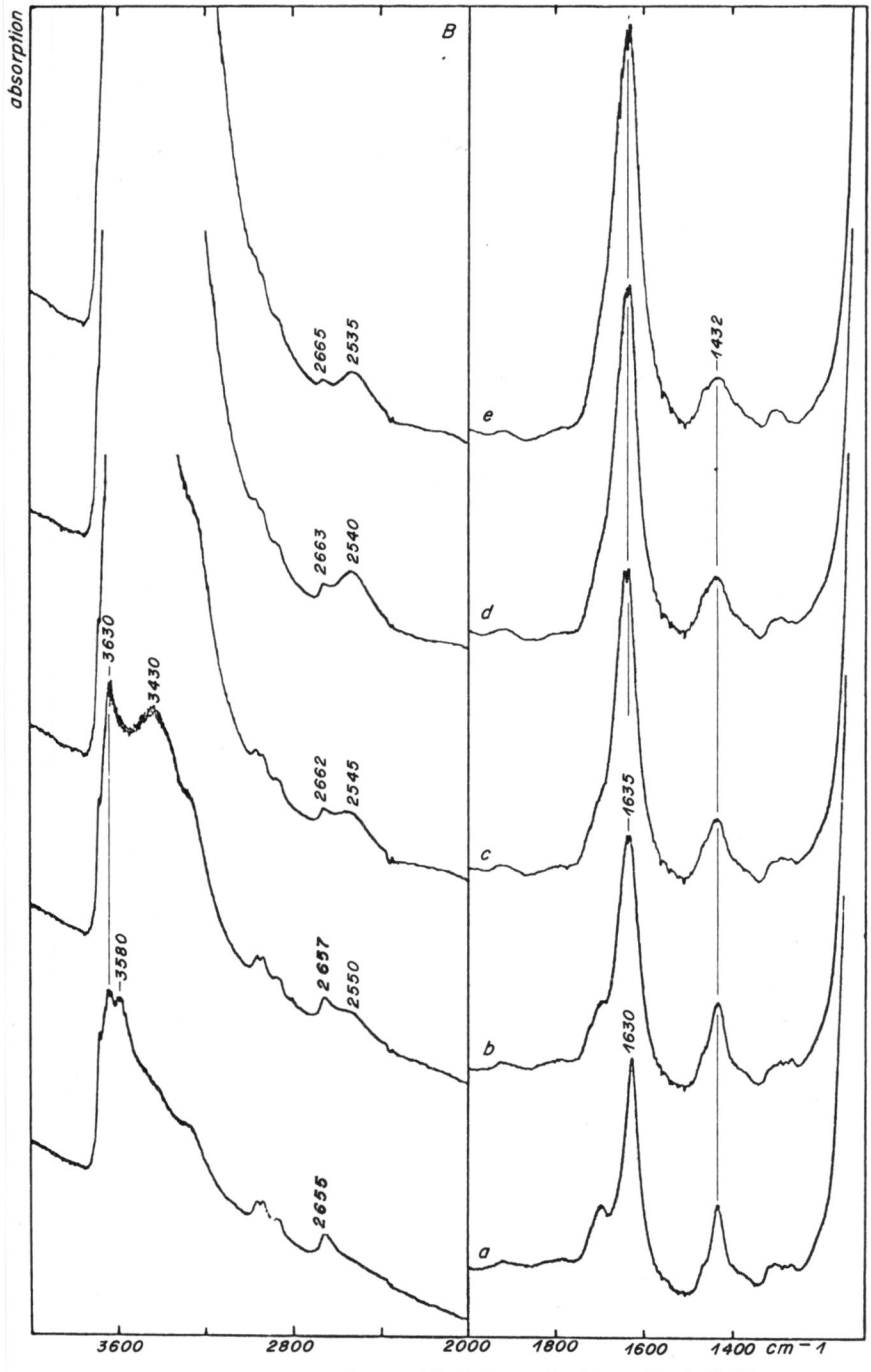


FIG. 39 B. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e* correspondent respectivement à 6-9-13-16 et 20 p. 100 d'eau. $\alpha = 30°$

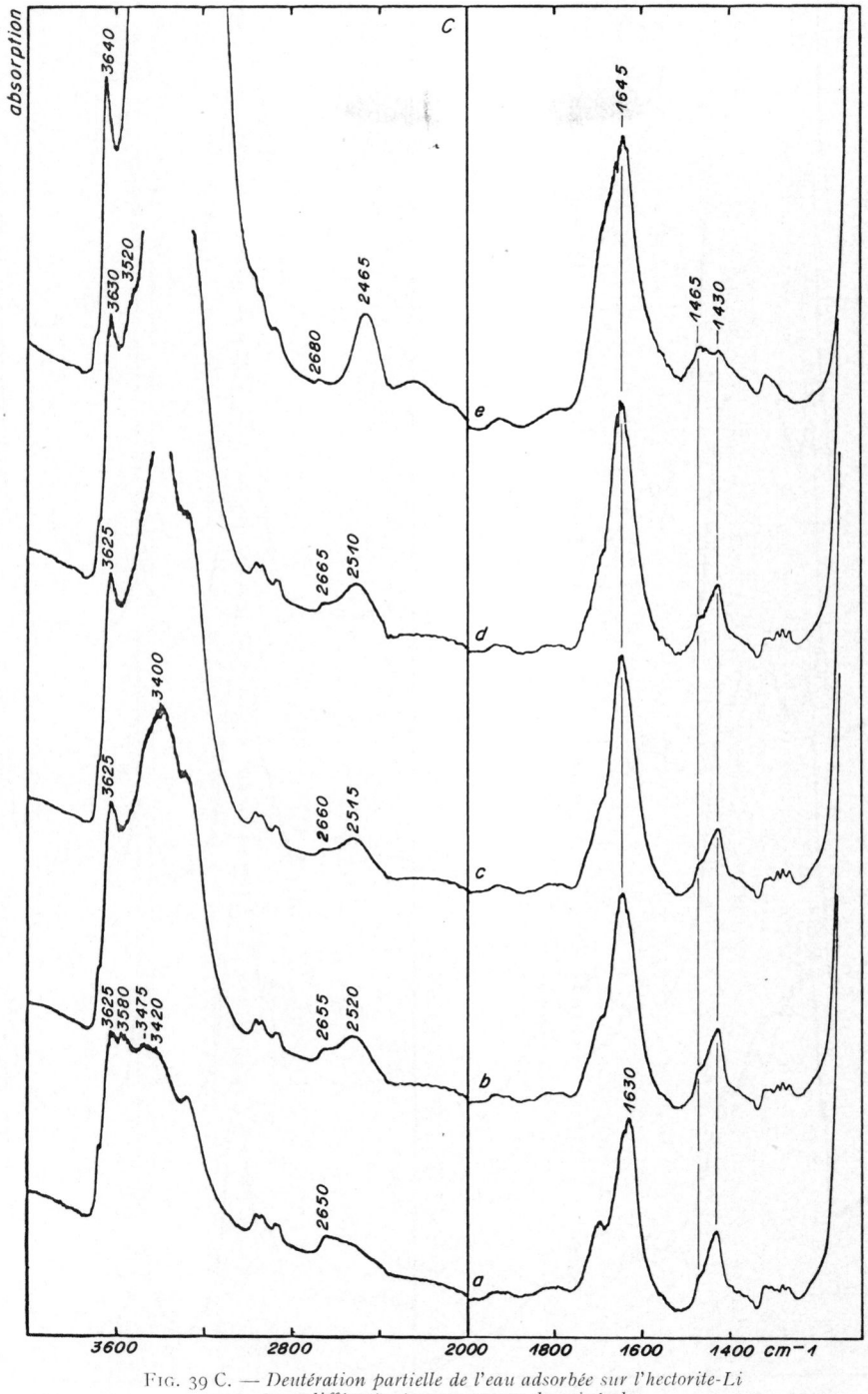


FIG. 39 C. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*, obtenus à — 125°C, correspondent respectivement à 6-9-13-16 et 20 p. 100 d'eau. $\alpha = 0°$

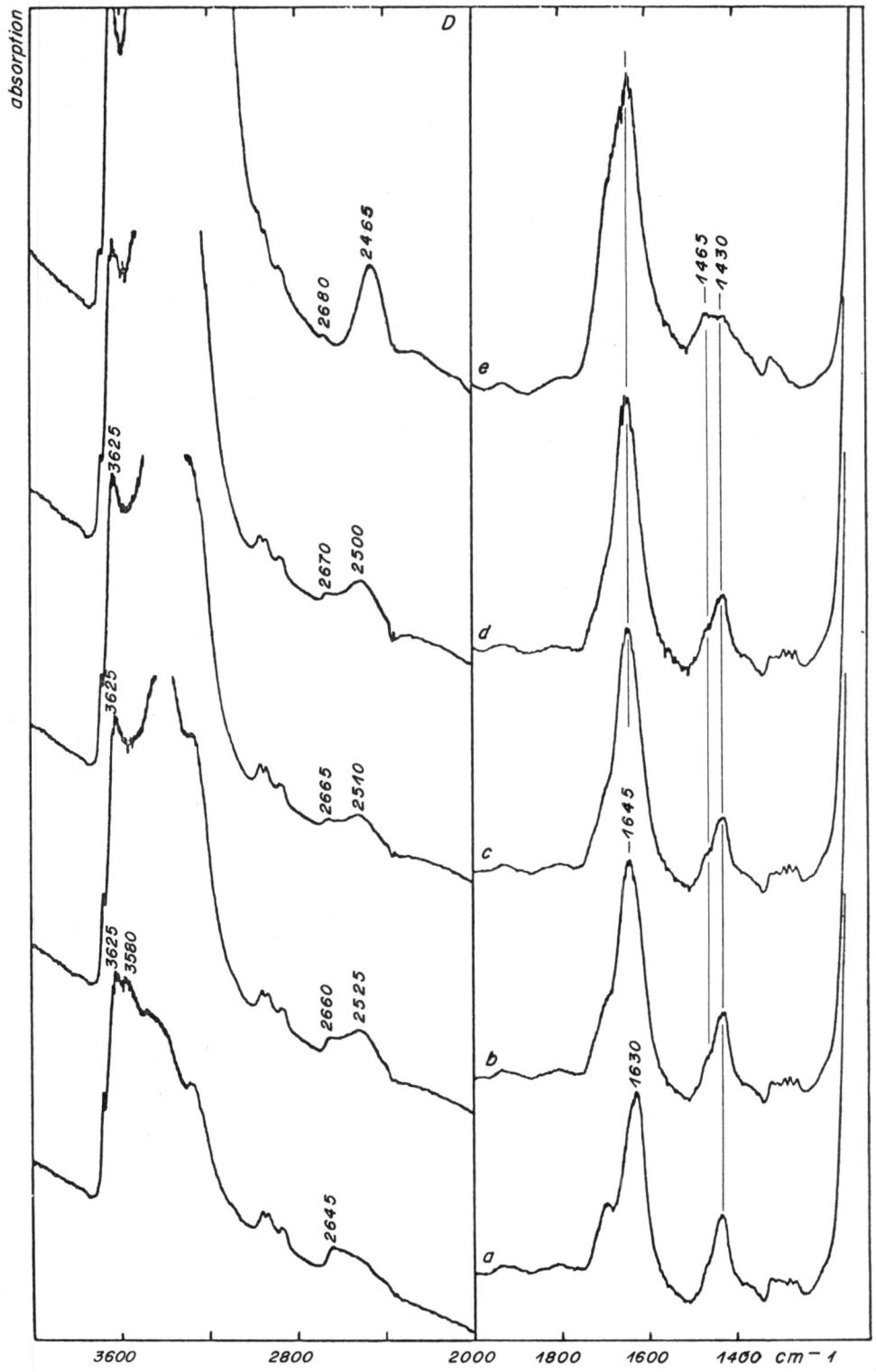
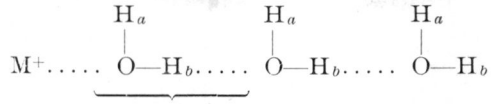


FIG. 39 D. — *Deutération partielle de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li pour différentes teneurs en eau du minéral*

Les spectres *a*, *b*, *c*, *d* et *e*, obtenus à — 125°C, correspondent respectivement à 6-9-13-16 et 20 p. 100 d'eau. $\alpha = 30°$

4. *Conclusion de l'étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li.*

L'interprétation du spectre d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Li repose sur le même schéma que celui invoqué pour l'hectorite-Na.



Lorsque l'argile contient 5 p. 100 d'eau, la plus grande partie des molécules d'eau adsorbées sont des molécules d'eau de solvatation des cations. Il y a formation de trihydrates. Chaque molécule d'eau a alors la symétrie C_{2v}. Quand la teneur en eau augmente, il apparaît une deuxième sphère d'hydratation des cations. Les molécules d'eau qui appartiennent à la première sphère de solvatation des cations perdent alors leur symétrie C_{2v} et acquièrent la symétrie C_s. Le deutéroxyle engagé dans une liaison hydrogène participe à l'absorption qui se développe à 2 550 cm^{-1}, tandis que le deutéroxyle non engagé dans une liaison hydrogène donne une bande d'absorption à une fréquence supérieure à 2 660 cm^{-1}. A ce stade, on retrouve des caractéristiques spectrales voisines de celles observées sur l'hectorite-Na. On note, en particulier, l'apparition de deux bandes à 3 520 et 3 630 cm^{-1} sur le spectre de l'hectorite-Li contenant 16 p. 100 d'eau (spectre *d* de la fig. 39 C).

Pour la teneur en eau la plus forte qui ait été étudiée (20 p. 100), il ne reste plus que deux bandes à 2 465 et 2 680 cm^{-1}. La disparition de la bande à 3 520 cm^{-1} et de l'absorption entre 2 465 et 2 680 cm^{-1} résulte d'un changement dans l'arrangement des molécules d'eau où il n'apparaît plus qu'une seule catégorie de molécules d'eau de symétrie C_s. L'effet polarisant du cation ne se fait pratiquement plus sentir (ZÜNDEL, 1969) et l'arrangement des molécules d'eau ne dépend plus que des propriétés intrinsèques de l'eau.

Le dichroïsme de la bande due aux groupes OH_a non engagés dans des liaisons hydrogène, indique que le moment de vibration de ces groupes OH est voisin de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet.

γ) *Hectorite-Ca.*

1. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Ca contenant 5 p. 100 d'eau. État II.*

Cette teneur en eau est obtenue par mise sous vide de l'échantillon. Elle correspond à une valeur de d_{001} de 12,8 Å. L'allure du spectre d'absorption infrarouge (fig. 40) montre qu'il s'agit de molécules d'eau de solvatation des cations.

La figure 40 représente les enregistrements correspondant à la deutération progressive de l'hectorite-Ca contenant 5 p. 100 d'eau. Cet échantillon contient des ions NH_4^+ qui sont à l'origine des bandes à 1 430-1 460 et 3 300 cm^{-1} (spectre *a* de la fig. 40 A). Leur existence a été confirmée par analyse chimique.

Le spectre des vibrations de déformation angulaire des molécules de H_2O et D_2O découplées (spectre *d* et *c* de la fig. 40) est formé d'une bande dissymétrique dont le maximum est légèrement décalé par rapport à celui qu'on observe pour les bandes H_2O ou D_2O des systèmes non ou complètement deutérés. Les spectres OH et OD de HOD (spectres *b* et *f* de la fig. 40) sont aussi formés d'une bande dissymé-

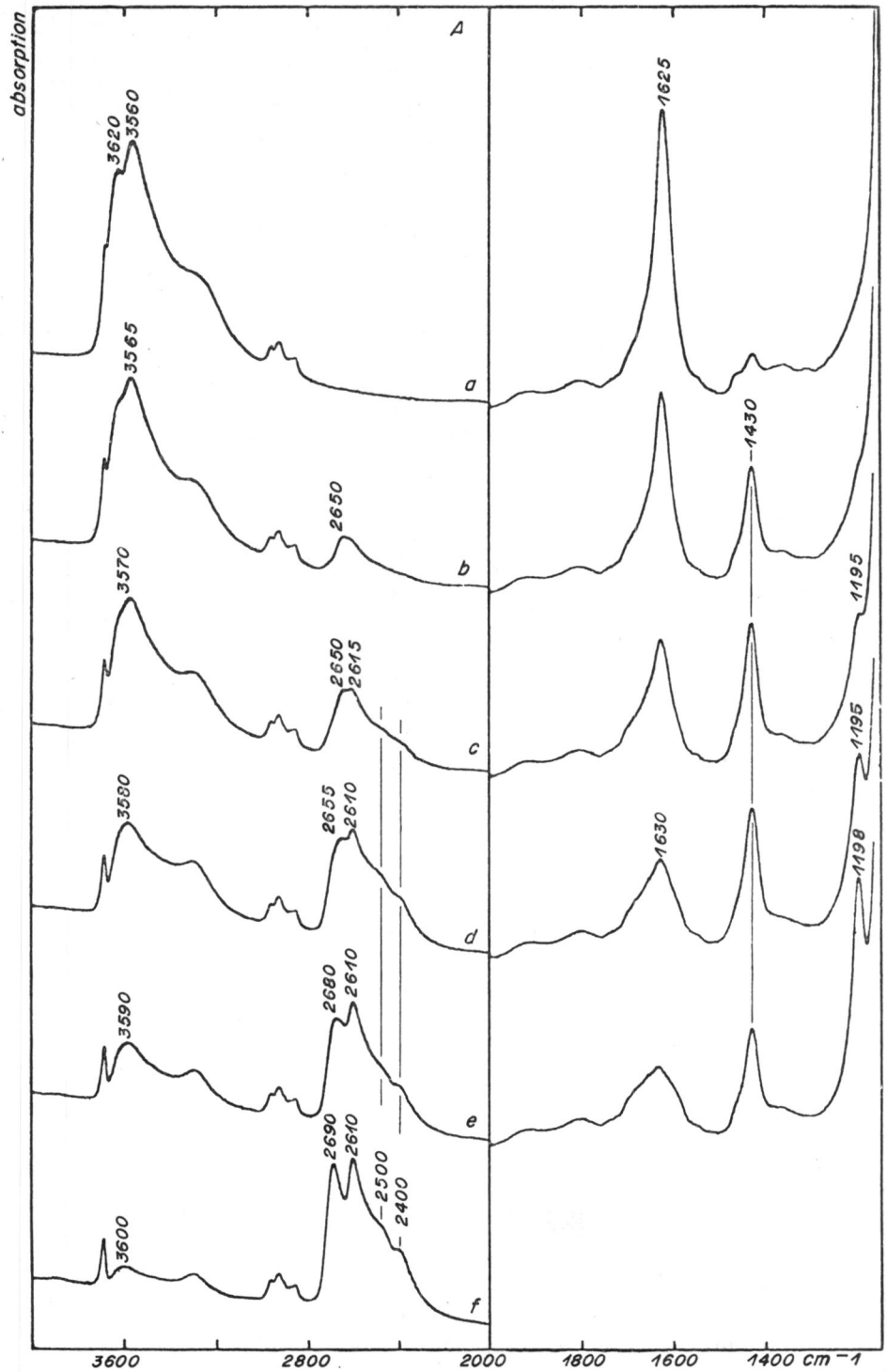


FIG. 40 A. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*) *de l'hectorite-Ca déshydratée par mise sous vide.* $\alpha = 0^{o}$

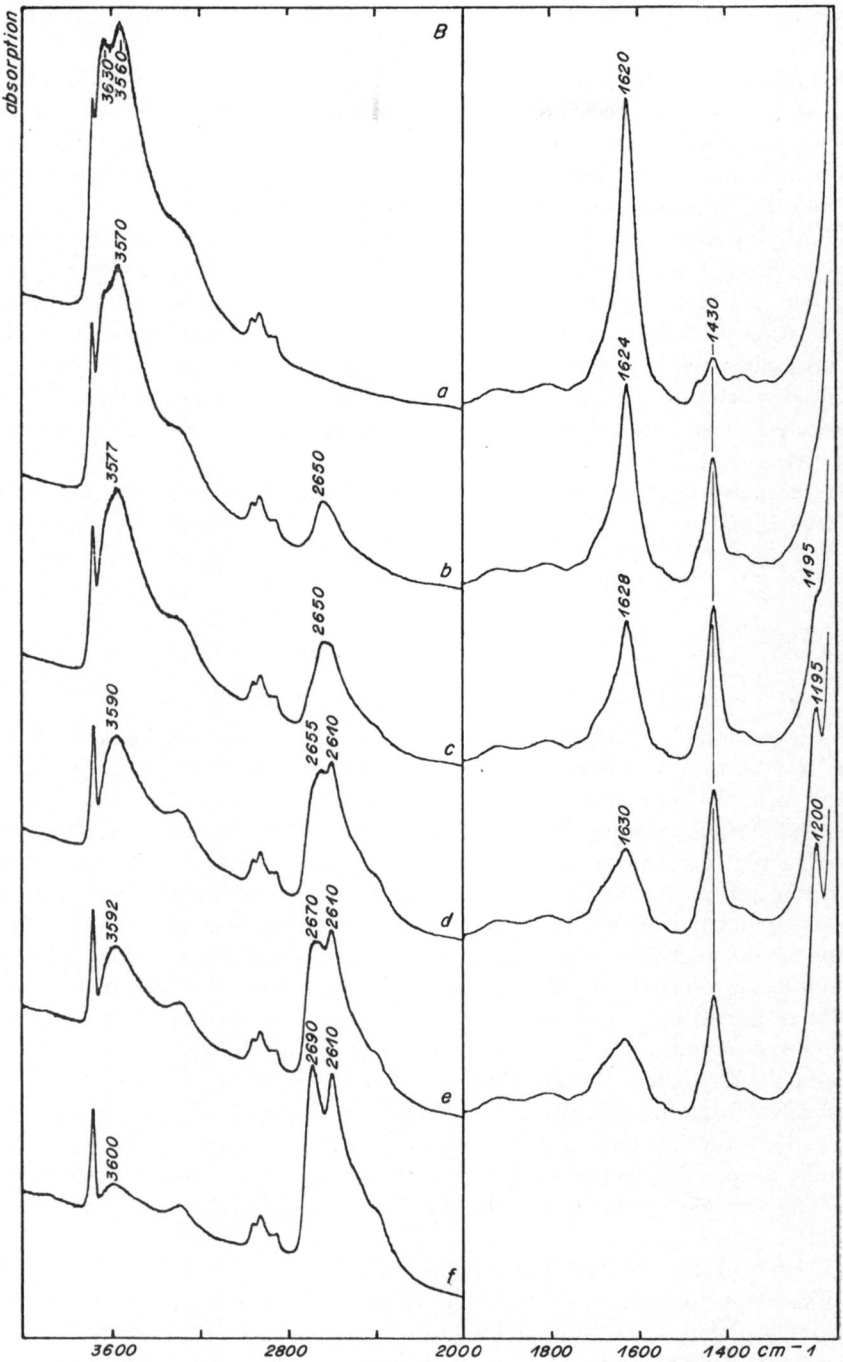


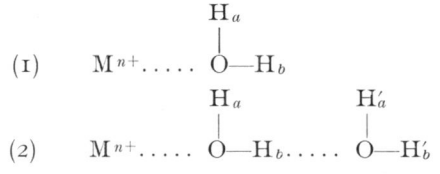
FIG. 40 B. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*) *de l'hectorite-Ca déshydratée par mise sous vide.* $\alpha = 45°$

trique dont les maximums apparents sont respectivement à 2 650 et 3 600 cm^{-1}. Le spectre de vibration de déformation angulaire de HOD est formé d'une bande à 1 430 cm^{-1}.

L'application du tableau 2 aux systèmes découplés décrits précédemment donne $n = 1$ et $n + m = 1$. Ceci montre que la plus grande partie des molécules d'eau présentes sur l'hectorite-Ca contenant 5 p. 100 d'eau, a la symétrie C_{2v}. Les fréquences de vibration de valence des groupes OH ou OD de HOD indiquent que ces molécules d'eau ne contractent pas de liaison hydrogène.

Ce résultat est en accord avec l'évolution du spectre lorsque le taux de substitution de H par D augmente (BELLAMY *et al.*, 1971). Il apparaît en effet, de part et d'autre de la bande à 2 650 cm^{-1} deux bandes à 2 610 et 2 690 cm^{-1}. Mais cette interprétation ne permet pas de rendre compte de l'absorption à 2 500 cm^{-1}. Il faut pour cela admettre l'existence d'une autre catégorie de molécules d'eau qui contractent des liaisons hydrogènes et dont la fréquence de vibration de déformation angulaire est voisine de 1 620 cm^{-1}. Il ne peut s'agir que de molécules d'eau ayant la symétrie C_s.

Cette interprétation implique l'existence simultanée des deux configurations suivantes :



L'existence de ces molécules d'eau de symétrie C_s explique la présence d'une bande de vibration de déformation angulaire du côté haute fréquence de la bande à 1 620 cm^{-1}, et l'apparition d'une bande de vibration de valence à 2 500 cm^{-1} correspondant aux groupes O—D_b (O—H_b) des molécules d'eau de symétrie C_s qui contractent des liaisons hydrogènes. Les groupes O—D_a (O—H_a) de ces molécules d'eau qui ne contractent pas de liaison hydrogène absorbent vers 2 610 cm^{-1}. Cette interprétation permet de rendre compte du dichroïsme observé à la fois sur les bandes à 2 610 et 2 690 cm^{-1} et leurs homologues à 3 560 et 3 620 cm^{-1}. Les molécules qui ont la symétrie C_{2v} donnent deux bandes à 2 610 et 2 690 cm^{-1} qui correspondent respectivement aux vibrations de valence symétriques et antisymétriques de la molécule d'eau. L'absence de dichroïsme au niveau de la bande de déformation angulaire de H_2O exclut la possibilité que le dichroïsme de la bande à 2 610 cm^{-1} soit dû aux vibrations de valence symétrique des molécules d'eau de symétrie C_{2v}. Le dichroïsme de la bande à 2 610 cm^{-1} est dû aux groupes O—D_a (O—H_a) des molécules d'eau de symétrie C_s qui ne contractent pas de liaison hydrogène. Ces hydroxyles ont leur moment de vibration voisin de la normale au plan (a, b) du feuillet.

Le moment de vibration antisymétrique des molécules d'eau de symétrie C_{2v} étant dichroïque, on retrouve un résultat identique à celui décrit pour l'hectorite-Li contenant 5 p. 100 d'eau. Il implique la même orientation des molécules d'eau par rapport au réseau de l'argile (fig. 38). L'existence de molécules d'eau de symétrie C_s suppose la présence d'une deuxième sphère d'hydratation des cations Ca^{++}. Les molécules d'eau de symétrie C_s appartiennent à la première sphère d'hydratation

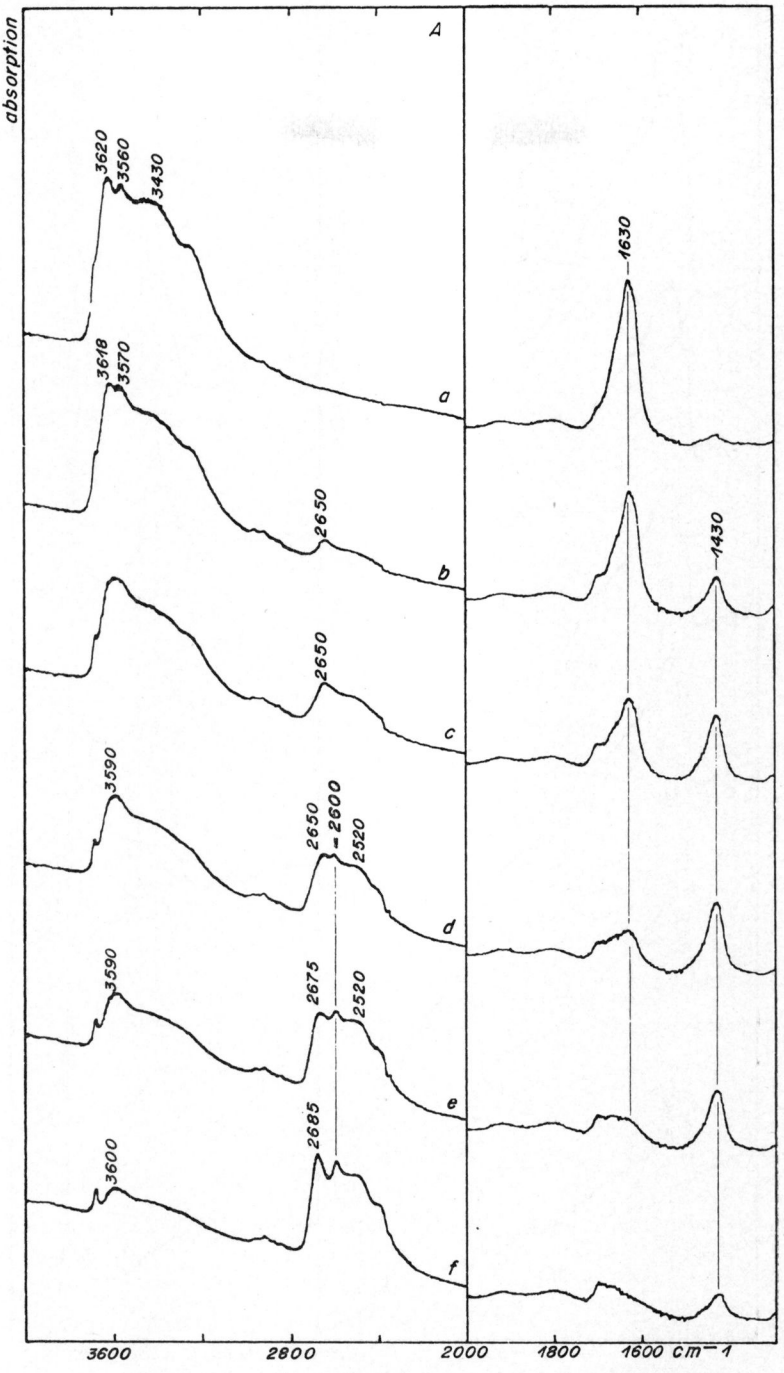


FIG. 41 A. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*) *de l'hectorite-Ca contenant environ 8 p. 100 d'eau.* $\alpha = 0^{o}$

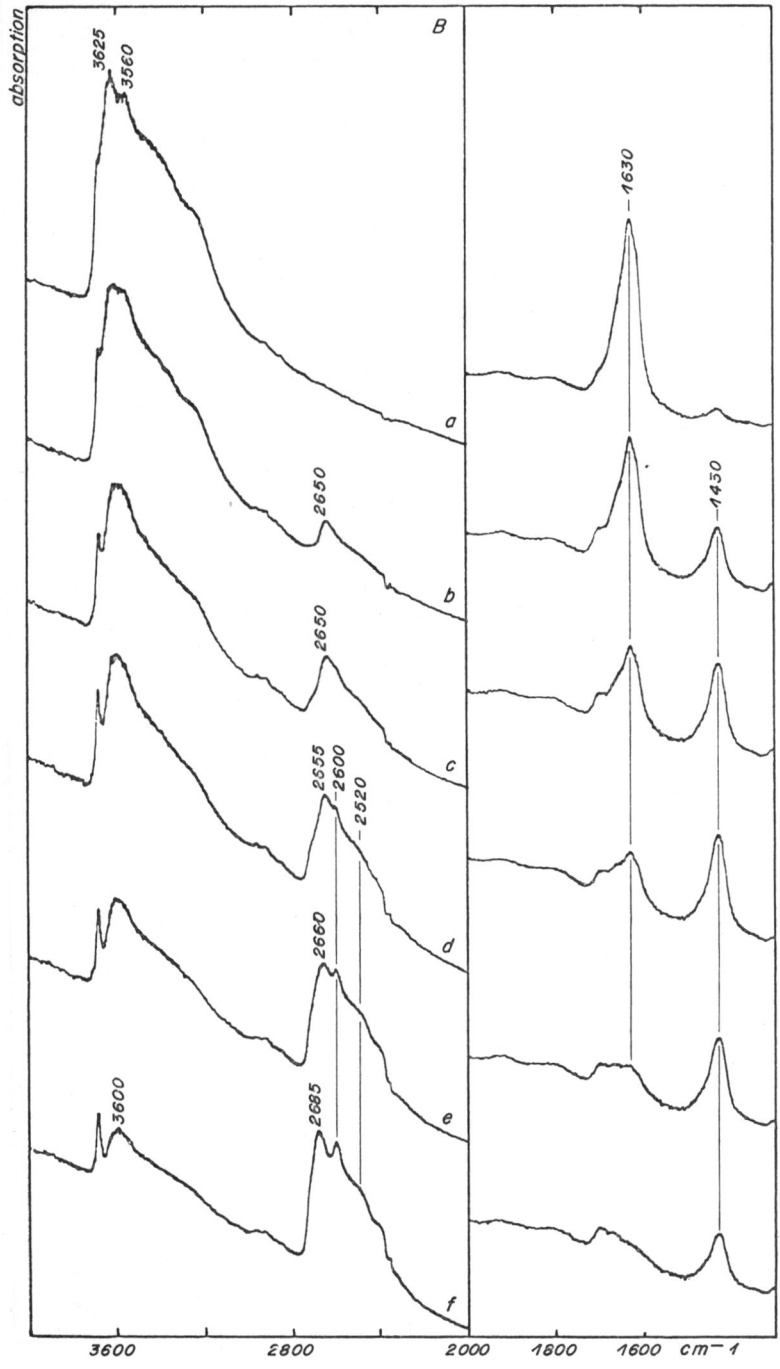


FIG. 41 B. — *Deutération progressive* (spectres *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f*) *de l'hectorite-Ca contenant environ 8 p. 100 d'eau.* $\alpha = 45°$

des cations. On conçoit, compte tenu de ce qui a été montré dans le cas de l'hectorite-Na, que l'intensité de la bande à 3 560 cm^{-1} soit supérieure à celle située à 3 620 cm^{-1}, car elle représente la somme de l'absorption due à la vibration symétrique des molécules d'eau de symétrie C_{2v} et de l'absorption due aux groupes O—H_a non engagés dans des liaisons hydrogène, des molécules d'eau de solvatation des cations de symétrie C_s.

2. *Étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Ca contenant 8 p. 100 d'eau.*

Cette teneur en eau correspond au point d'inflexion de la courbe d'ouverture (d_{001} = 13,3 Å) (fig. 28). Le contrôle de la teneur en eau est assuré grâce au dispositif représenté sur la figure 4 de l'annexe.

La figure 41 représente les enregistrements correspondants à la deutération progressive de l'hectorite-Ca contenant 8 p. 100 d'eau. Il s'agit d'un échantillon fraîchement préparé qui ne contient pas d'ions NH_4^+.

On observe qualitativement le même spectre pour les vibrations de déformation angulaire des molécules H_2O et D_2O découplées et pour HOD que dans le cas de l'hectorite-Ca contenant 5 p. 100 d'eau. Par contre, les spectres OH et OD de HOD diffèrent par l'apparition très nette d'une absorption à basse fréquence, respectivement à 3 430 et 2 520 cm^{-1}. On note aussi le changement d'intensité relative des bandes à 3 560 et 3 620 cm^{-1} et à 2 600 et 2 685 cm^{-1}. Le développement simultané de l'absorption à 2 520 et à 2 685 cm^{-1} montre que l'adsorption d'eau a provoqué l'apparition de molécules d'eau de symétrie C_s. De même que pour l'hectorite-Na, la fréquence élevée (2 685 cm^{-1}) des groupes OD des molécules d'eau de symétrie C_s qui ne sont pas engagés dans des liaisons hydrogène, indique qu'il s'agit de molécules d'eau éloignées des cations Ca^{++}. La bande à 2 600 cm^{-1} étant due aux groupes OD des molécules d'eau de symétrie C_s qui ne sont pas engagés dans des liaisons hydrogène, mais qui appartiennent à la première sphère d'hydratation des cations. La bande à 2 600 cm^{-1} existe sur les systèmes plus hydratés où la probabilité d'avoir des molécules de symétrie C_{2v} non engagées dans des liaisons hydrogène diminue, alors que le nombre des molécules d'eau de solvatation des cations reste le même (spectre *f* de la fig. 41).

Les enregistrements obtenus à — 125°C pour l'eau adsorbée sur l'hectorite-Ca contenant une quantité d'eau voisine de 8 p. 100 (fig. 42), montrent clairement l'existence de 4 bandes de vibration de valence à 3 450, 3 490, 3 542 et 3 615 cm^{-1}. Les bandes à 3 542 et 3 615 cm^{-1} sont dichroïques. Ces 4 bandes sont dues aux deux catégories de molécules d'eau de symétrie C_s. Celles qui appartiennent à la première sphère d'hydratation des cations donnent les bandes à 3 450 et 3 542 cm^{-1} et celles qui sont éloignées du cation donnent les bandes à 3 490 et 3 615 cm^{-1}. Le dichroïsme des bandes à 3 542 et 3 615 cm^{-1}, dues aux groupes O—H_a qui ne contractent pas de liaison hydrogène, indique que le moment de vibration de ces hydroxyles est voisin de la normale au plan (*a*, *b*).

3. *Conclusion de l'étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite-Ca.*

Ces expériences effectuées sur de l'hectorite-Ca montrent, d'une part, les changements qui interviennent dans la structure des molécules d'eau lorsque l'argile s'hydrate et, d'autre part, que l'hydratation des espaces interlamellaires se fait à partir des entités cations hydratés.

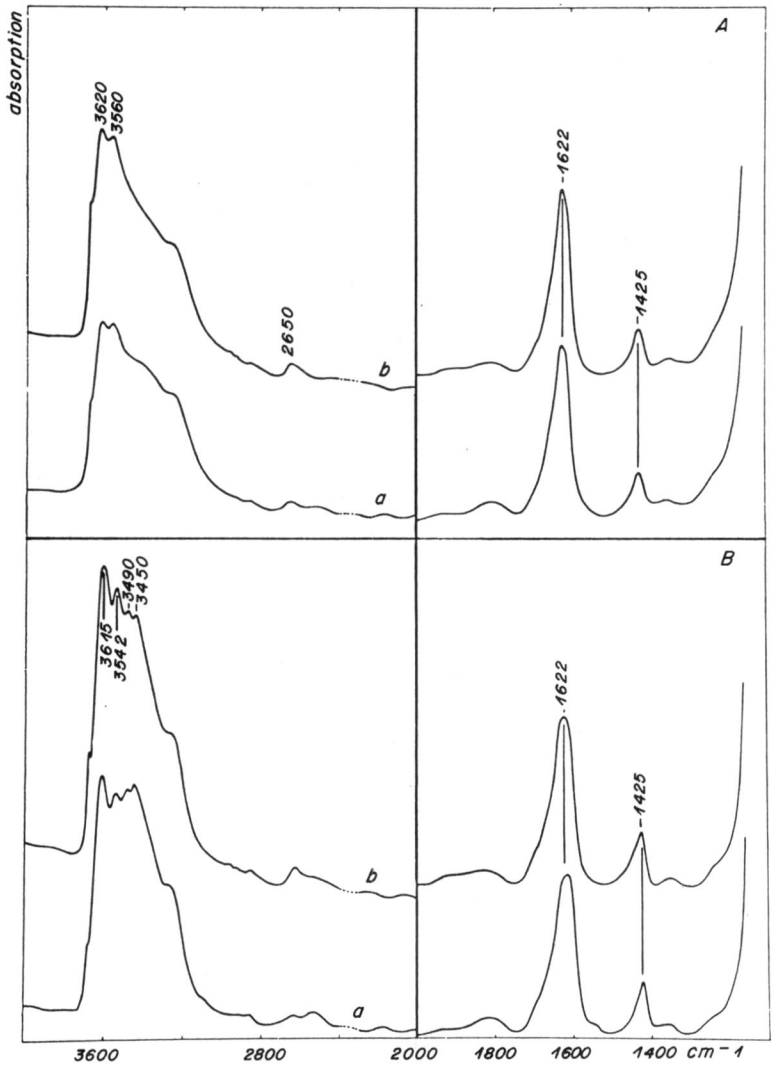


FIG. 42. — *Spectre infrarouge de l'hectorite-Ca contenant environ 8 p. 100 d'eau.*

A : à la température du spectrographe
B : à — 125°C
a et *b* correspondent respectivement à $\alpha = 0°$ et $\alpha = 45°$

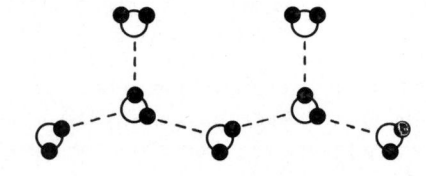
3. — Conclusion de l'étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite

L'étude de l'eau adsorbée sur l'hectorite par spectroscopie infrarouge nous a conduit à distinguer plusieurs états pour les molécules d'eau adsorbées, en fonction de la teneur en eau du minéral. Ces états sont différents suivant la nature du cation compensateur. Les échantillons d'hectorite étudiés peuvent globalement se classer en deux catégories. On considère d'une part l'hectorite-Na, K et Cs et d'autre part l'hectorite-Li, Mg, Ca, Sr et Ba.

Le tableau 9 donne une représentation schématique des états de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction de l'humidité relative dans laquelle l'échantillon est

TABLEAU 9

Représentation schématique des états de l'eau adsorbée sur l'hectorite en fonction de l'humidité relative de l'air

humidité relative	hectorite-Na, K ou Cs	hectorite-Li, Mg, Ca, Sr ou Ba
0 %	eau piégée	$M^{n+} \cdots O(H_a)-H_b$ eau de solvatation des cations
< 50 %	$M^{n+} \cdots O(H_a)-H_b \cdots O(H_a)-H_b \cdots O(H_a)-H_b + (H_2O)_x$ eau de solvatation des cations — eau de remplissage — eau externe	
> 50 %	 + $(H_2O)_x$ eau interfoliaire — eau externe	

placé. A chacun de ces états correspond un spectre infrarouge dont les fréquences caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 8.

Il est maintenant possible, connaissant la structure et l'arrangement des molécules d'eau adsorbées sur l'hectorite, suivant l'état d'hydratation du minéral, d'imaginer un mécanisme pour l'hydratation de l'argile. Ce mécanisme est différent suivant la nature du cation compensateur. C'est ainsi qu'aux faibles humidités relatives, lorsque l'hectorite est saturée par Na^+, K^+ ou Cs^+, l'hydratation se fait feuillet par feuillet suivant le schéma représenté sur le tableau 9 et correspondant à une humidité relative inférieure à 50 p. 100. Par contre lorsque l'hectorite est saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} ou Ba^{++} il y a d'abord constitution d'une seconde sphère d'hydratation autour des entités qui existent lorsque le minéral est placé dans une atmosphère à humidité relative nulle. Aux fortes humidités relatives l'effet du cation se fait beaucoup moins sentir et l'arrangement des molécules d'eau dépend de plus en plus des propriétés intrinsèques de l'eau.

Bien que les données spectroscopiques, qui ont permis l'identification des différents états de l'eau, concernent essentiellement les bandes hautes fréquences du spectre qui n'existent pas sur le spectre de l'eau liquide et que nous attribuons à l'eau qui est en contact avec la phase solide, il est nécessaire, pour une approche quantitative du mécanisme de l'hydratation de l'argile, de connaître les quantités d'eau qui ne sont pas en contact avec la surface du minéral.

Nous proposons, dans le prochain chapitre, une approche pour l'estimation quantitative de la fraction de l'eau qui n'est pas en contact avec le solide. Cette approche repose sur la perturbation exercée par l'eau adsorbée sur les hydroxyles de constitution du minéral.

Chapitre IV

DISCUSSION GÉNÉRALE

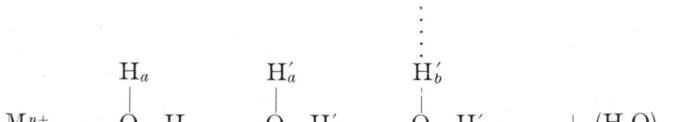
Cette discussion concerne à la fois les propriétés générales du spectre d'absorption de l'eau adsorbée sur les argiles, les interactions qui existent entre l'eau et le support argileux, et les différents états de l'eau en fonction de la teneur en eau du minéral. Enfin, la connaissance des interactions de l'eau avec les hydroxyles de constitution de l'argile nous a permis d'aborder le problème de la répartition de l'eau adsorbée dans les espaces interlamellaires et sur la surface externe des cristallites.

1. — *Caractères généraux du spectre d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur les argiles*

Les argiles que nous avons étudiées et dont nous nous proposons de discuter les propriétés sont des argiles di ou trioctaédriques mais dont la charge, lorsqu'elle existe, résulte d'un défaut de charge positive en position octaédrique. Les résultats trouvés avec ces échantillons ne sont pas directement transposables au cas des minéraux dont la charge est localisée en position tétraédrique. Il y a, dans ce cas, des possibilités de liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène

des tétraèdres où les ions Si^{++++} ont été remplacés par des ions Al^{+++}. C'est ce qui se passe pour l'eau présente dans la natrolite.

L'étude du spectre d'absorption infrarouge de l'eau adsorbée sur les argiles est abordée pour différents états d'hydratation du minéral. Si nous prenons comme état de référence celui correspondant à l'argile séchée à l'air, l'eau présente dans le minéral peut être représentée par le modèle suivant :



La déshydratation de l'argile se fait suivant deux mécanismes différents qui dépendent de la nature du cation compensateur. Quand il s'agit des cations Na^+, K^+ et Cs^+, nous sommes conduit à considérer que la déshydratation s'effectue feuillet par feuillet. Par contre s'il s'agit des cations Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} il y a élimination d'une fraction de $(H_2O)_x$ puis des molécules d'eau $O{-}H'_b$ appartenant aux sphères d'hydratation successives des cations.

A chacun de ces états correspond un spectre infrarouge caractéristique.

a) *État hydraté* (argile placée dans une atmosphère dont l'humidité relative est voisine de 50 p. 100).

Cet état correspond à une teneur en eau de l'argile qui varie entre 10 et 15 p. 100, suivant la nature du cation compensateur. Quelle que soit l'argile étudiée nous avons toujours trouvé pour le spectre des vibrations de valence de l'eau les quatre bandes suivantes : 3 240-3 280, 3 380-3 420, 3 560-3 570 et 3 620-3 630 cm^{-1}.

La bande à 3 240-3 280 cm^{-1} est probablement l'harmonique 2 ν_2 de la vibration de déformation angulaire de H_2O. En effet cette bande disparaît sur les spectres OH de HOD (fig. 33).

La bande à 3 380-3 420 cm^{-1} est due aux molécules d'eau associées par liaison hydrogène $(H_2O)_x$ et aux groupes $O{-}H_b$ et $O{-}H'_b$ inclus dans des liaisons hydrogène.

La bande à 3 560-3 570 cm^{-1} est attribuée dans le cas de l'attapulgite, de la sépiolite et de l'hectorite aux groupes $O{-}H_a$, c'est-à-dire aux hydroxyles des molécules d'eau de solvatation des cations de symétrie C_s qui ne contractent pas de liaison hydrogène.

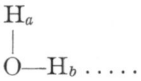
Enfin la bande à 3 630 cm^{-1} est due aux groupes $O{-}H'_a$ des molécules d'eau zéolitiques ou de remplissage de symétrie C_s qui ne contractent pas de liaison hydrogène.

La différence de fréquence entre les groupes $O{-}H_a$ et $O{-}H'_a$ est due à l'effet polarisant du cation qui entraîne un renforcement de la liaison hydrogène $O{-}H_b \ldots\ldots O$ et un abaissement de la fréquence des groupes $O{-}H_a$ par rapport à celle des groupes $O{-}H'_a$ (Saumagne, 1970 ; Bellamy *et al.*, 1971).

Dans le cas de l'hectorite, lorsque la teneur en eau augmente, et que le système passe à deux couches l'effet polarisant du cation diminue et la bande à 3 560 cm^{-1} disparaît.

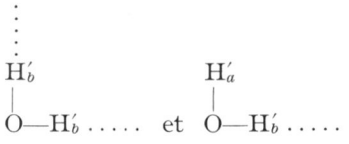
Ce modèle fait apparaître trois types de molécules d'eau :

1° les molécules d'eau de solvatation des cations



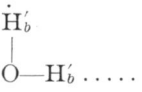
qui ont la symétrie C_s,

2° les molécules d'eau zéolitiques ou de remplissage



qui ont la symétrie C_{2v} ou C_s,

3° les molécules d'eau qui recouvrent les surfaces externes $(H_2O)_x$. Ces molécules d'eau ont la même symétrie C_{2v} que les molécules



Selon qu'il s'agit de minéraux fibreux ou de l'hectorite, les proportions relatives de l'un ou l'autre de ces types d'eau changent. Si on estime le nombre des cations octaédriques de bord de l'attapulgite et de la sépiolite en meq/100 g on a respectivement 580 et 380 meq/100 g de cation qu'il faut alors comparer aux 76 meq/100 g de l'hectorite. On conçoit dans ces conditions que la bande à 3 560-3 570 cm^{-1} qui correspond aux hydroxyles des molécules d'eau de solvatation des cations qui ne contractent pas de liaison hydrogène, soit beaucoup plus importante dans le cas de l'attapulgite que dans celui de la sépiolite et enfin, que dans celui de l'hectorite. Inversement la bande à 3 630 cm^{-1} est moins importante pour les minéraux fibreux que pour l'hectorite.

Le dichroïsme des groupes O—H_a et O—H'_a indique que la direction de ces groupements est voisine de la normale au plan (*a*, *b*) du feuillet. En conséquence les molécules d'eau qui forment la couche d'eau interfoliaire ont une disposition analogue à celle représentée par la figure 38. Pour l'état monocouche cet arrangement est tout à fait conforme à celui proposé pour la montmorillonite par Mamy (1968).

b) *État faiblement hydraté* (argile placée dans une atmosphère dont l'humidité relative est voisine de 0 p. 100).

Il ne reste plus à la surface de l'argile que l'eau de solvatation des cations ou de l'eau piégée.

Dans ces conditions d'hydratation, le spectre infrarouge de l'eau dépend de la structure de l'argile mais, surtout, de la nature du cation. On distingue, les cations qui ont une énergie d'hydratation faible (Na^+, K^+ et Cs^+) et ceux dont l'énergie d'hydratation est grande (Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}).

1. Dans le premier cas, où l'hectorite est saturée par Na^+, K^+ et Cs^+, l'eau qui reste fixée sur l'argile est de l'eau piégée et on n'observe pas de spectre infrarouge caractéristique.

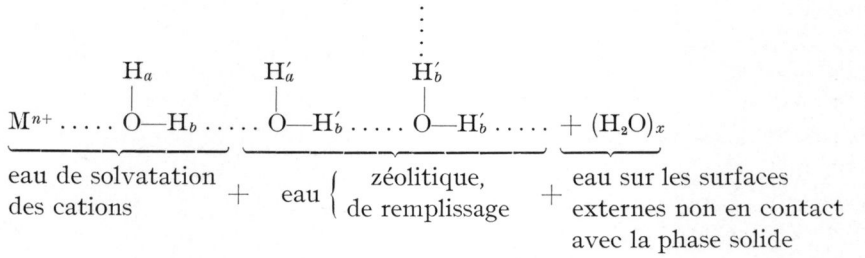
2. Le second cas concerne l'hectorite saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++} et les argiles fibreuses.

L'hectorite saturée par les cations cités précédemment donne une bande de déformation angulaire à 1 630 cm^{-1}. Ces molécules d'eau ont la symétrie C_{2v} et nous attribuons les bandes à 3 580 et 3 630 cm^{-1} respectivement aux vibrations symétriques et antisymétriques des molécules d'eau de solvatation des cations.

L'attapulgite et la sépiolite, complètement débarrassées de l'eau zéolitique qu'elles contiennent naturellement, donnent une bande de déformation angulaire, respectivement à 1 622 et 1 612 cm^{-1}, et deux bandes de vibration de valence respectivement à 3 530-3 590 cm^{-1} et à 3 533-3 600 cm^{-1}. Dans les deux cas, les molécules d'eau ont la symétrie C_s.

2. — *Définition des différents états de l'eau qui apparaissent au cours de la déshydratation de l'argile*

Nous avons représenté schématiquement les différentes formes d'eau adsorbées à la surface de l'argile séchée à l'air de la façon suivante :



Au début de la déshydratation, il y a élimination de l'eau adsorbée sur les surfaces externes et de l'eau zéolitique ou de remplissage, puis ensuite, élimination de l'eau de solvatation des cations. Ce mécanismme est celui qui se rapporte au cas des minéraux fibreux et de l'hectorite saturée par Li^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Sr^{++} et Ba^{++}.

Lorsque M^{n+} est Mg^{++}, l'élimination de l'eau de solvatation se fait en deux étapes aussi bien sur l'hectorite (courbes d'A.T.D.) que sur la sépiolite (courbe d'A.T.P.). Par contre, s'il s'agit de l'hectorite-Na, K ou Cs, il y a élimination d'une partie de l'eau adsorbée sur les surfaces externes, puis ensuite, déshydratation feuillet par feuillet.

L'analogie entre les minéraux fibreux et l'hectorite se poursuit jusque dans les modifications de l'espace interlamellaire en fonction de l'état d'hydratation. Pour les minéraux fibreux, la réduction de l'espace interlamellaire se fait d'abord par une légère modification du paramètre *a* lorsque l'eau zéolitique est évacuée, puis brutalement, par basculement des lattes, lorsqu'il ne reste plus qu'une seule molécule d'eau de cristallisation par cation.

3. — *Interactions des molécules d'eau adsorbées avec les hydroxyles du réseau de l'argile*

L'élimination de l'eau zéolitique ou de remplissage entraîne un déplacement de la bande de déformation angulaire R—OH et de la bande de vibration de valence des groupes OH du minéral. S'il s'agit de minéraux trioctaédriques, la bande de vibration de valence des groupes OH se déplace vers les basses fréquences lorsqu'on déshydrate le minéral, mais s'il s'agit de minéraux dioctaédriques, le déplacement se fait du côté des hautes fréquences. Le sens du déplacement des bandes de vibration de déformation angulaire est le contraire du sens observé pour les vibrations de valence.

TABLEAU 10

Modifications des fréquences de vibration des hydroxyles de constitution des argiles suivant l'état d'hydratation du minéral

	Nature de l'argile	Nature de l'agent perturbateur	Vibration de déformation angulaire : R—OH (cm^{-1})		Vibration de valence OH (cm^{-1})	
			hydraté	déshydraté	hydraté	déshydraté
Trioctaédrique	Vermiculite (Fernandez *et al.*, 1970)	Na^+ Ba^{++} $R\text{-}NH_3^+$			3 680 3 680	3 708 3 735 3 725
	Phlogopite (Chaussidon, 1970)	K^+ Na^+			3 677	3 712 3 712
	Sépiolite	H_2O	645	655	3 690	3 680
	Hectorite	H_2O	645	655	3 690	3 680
Dioctaédrique	Montmorillonite (Russell *et al.*, 1964)	Mg^{++} Ca^{++}			3 630 3 630	chauffée à 220°C 3 496 3 533
	Attapulgite	H_2O	940	930	3 620	3 630

Nous avons rassemblé dans le tableau 10 plusieurs exemples de perturbation des groupes OH de constitution de l'argile par des cations. Il ressort des études effectuées par Russell *et al.* (1964), Fernandez *et al.* (1970) et Chaussidon (1970) que la perturbation exercée par les cations compensateurs se traduit par une augmentation ou une diminution de la fréquence de vibration des hydroxyles de constitution, suivant que le minéral est tri ou dioctaédrique. C'est ainsi que dans le cas de la phlogopite altérée et saturée par Na^+, il n'y a pas de modification de la fréquence de vibration des groupes OH (3 677 cm^{-1}) lorsque les cations sont éloignés des hydroxyles, par suite de l'hydratation de l'argile. Il y a perturbation lorsque la phlogopite est déshydratée et que les cations compensateurs viennent à l'aplomb des

cavités hexagonales au fond desquelles se trouvent les protons des groupes OH de constitution. Le rapprochement des deux charges positives portées par les cations compensateurs et les protons des groupes OH de constitution des minéraux trioctaédriques sont à l'origine du déplacement de fréquence de 3 677 vers 3 712 cm^{-1} (CHAUSSIDON, 1970). Par contre dans le cas de la montmorillonite, qui est dioctaédrique, la perturbation exercée par les cations compensateurs sur les groupes OH de constitution entraîne un déplacement de la bande de vibration de valence des hydroxyles de constitution, de 3 630 cm^{-1} vers 3 496 cm^{-1} si le cation est Mg^{++}, et

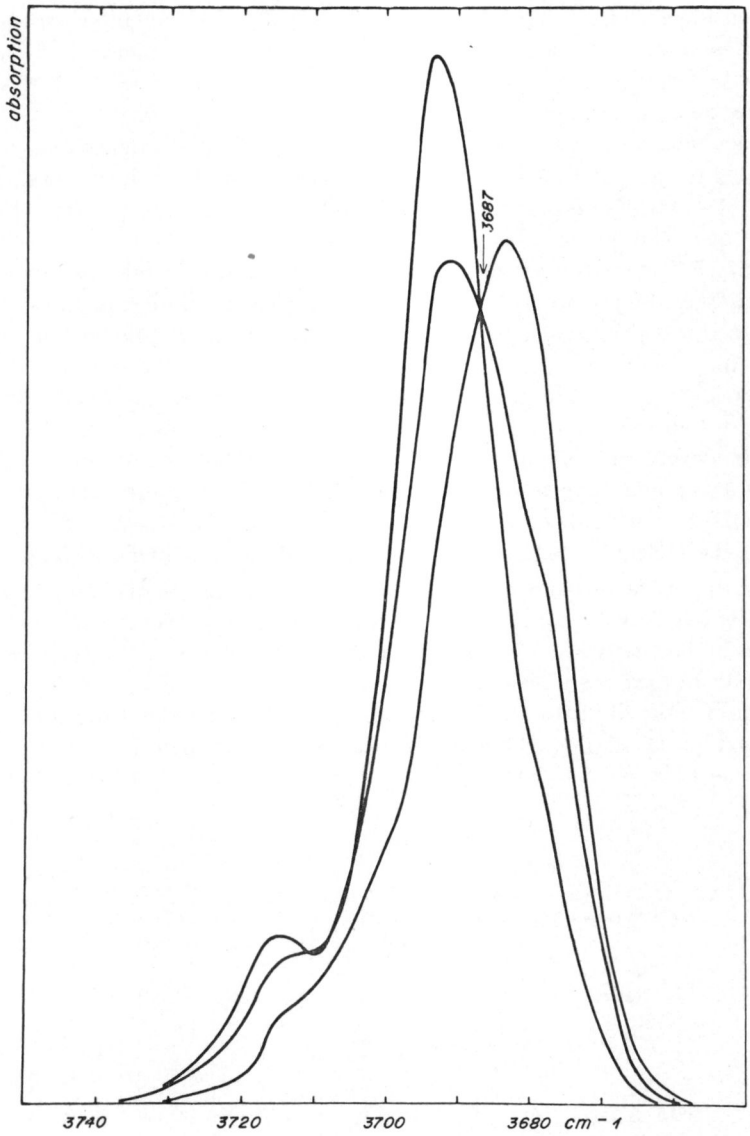


FIG. 43. — *Spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de l'hectorite-Ba pour différentes teneurs en eau de l'argile*

vers 3 533 cm^{-1} si le cation est Ca^{++}. Dans ce cas, c'est l'orbitale libre de l'atome d'oxygène du groupement OH qui est dirigée vers le cation, ce qui entraîne un abaissement de la fréquence de vibration de valence de l'hydroxyle.

On observe dans le cas de la sépiolite et de l'attapulgite un déplacement de la fréquence de vibration de valence des hydroxyles de constitution avec l'état d'hydratation du minéral. Ces minéraux ne présentent ni déficit de charge, ni modification importante du volume interlamellaire lors de l'évacuation de l'eau zéolitique ; en conséquence, la perturbation observée au niveau de la fréquence de vibration des hydroxyles doit être imputée aux molécules d'eau elles-mêmes. Dans ces conditions, on doit considérer la fréquence de vibration des groupes OH constatée sur les systèmes déshydratés comme étant la fréquence non perturbée. D'ailleurs la fréquence de 3 680 cm^{-1}, observée dans le cas de la sépiolite débarrassée de son eau zéolitique, est voisine de celle du talc (3 677 cm^{-1}).

Le sens du déplacement de la fréquence de vibration de valence des groupes OH de la sépiolite de 3 680 vers 3 690 cm^{-1}, quand on hydrate le minéral, révèle en outre, qu'il s'agit d'une perturbation exercée par une charge positive, laquelle ne peut être que celle des protons des molécules d'eau.

De même, le déplacement de la fréquence de vibration de valence des groupes OH de l'attapulgite de 3 630 vers 3 620 cm^{-1}, par hydratation du minéral, montre qu'il s'agit aussi d'une perturbation exercée par la charge positive que portent les protons des molécules d'eau.

Rappelons que l'étude de l'évolution du spectre infrarouge de la sépiolite et de l'attapulgite, en fonction de la teneur en eau du minéral, met en évidence l'action ponctuelle d'une molécule d'eau sur un groupe OH de constitution. C'est ainsi que nous avons expliqué le dédoublement de la bande de vibration de valence des groupes OH de constitution de la sépiolite chauffée à 250 °C sous vide. En effet, au niveau de chaque cavité hexagonale, la constante d'écran attachée à chaque molécule d'eau, modifie de façon sensible le champ électrique $\vec{E}$ dans lequel est placé l'oscillateur O—H. Cette analyse est voisine de celle proposée par WHITE *et al.* (1967) pour expliquer la perturbation des groupes OH des zéolites-Y, débarrassées de leurs cations, par des gaz adsorbés physiquement.

Le spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de l'hectorite (fig. 43) est formé de deux bandes résolues, lorsque l'argile est hydratée. L'analyse chimique de l'hectorite montre qu'une partie des ions Mg^{++} est remplacée par des

TABLEAU II

Nature et probabilité d'existence des différentes configurations auxquelles les hydroxyles de l'hectorite sont liés

Nature des configurations	Probabilité d'existence
Mg^{++} Mg^{++} Mg^{++}	0,737
Mg^{++} Mg^{++} Li^{+}	0,237
Mg^{++} Li^{+} Li^{+}	0,025
Li^{+} Li^{+} Li^{+}	0,001

ions Li^+. On admet, comme CHAUSSIDON (1970), que l'apparition de la bande à plus haute fréquence est due aux hydroxyles liés à la fois à des ions Li^+ et Mg^{++}. Les groupes OH de l'hectorite peuvent être liés aux cations octaédriques de 4 manières différentes. Le tableau 11 indique les différentes configurations possibles et leur probabilité d'existence. Seules les bandes correspondant aux deux premières configurations sont détectables.

Sur le spectre enregistré à la température du spectrographe de l'hectorite-Ba, déshydratée par chauffage sous vide à 200°C pendant quelques minutes (fig. 44), apparaît une bande nouvelle à 3 743 cm^{-1}. La fréquence de cette bande est voisine de celle trouvée par FERNANDEZ *et al.*, (1970) avec la vermiculite-Ba déshydratée (3 735 cm^{-1}). Ces auteurs l'attribuent aux groupes OH perturbés par les cations Ba^{++}. Par conséquent la bande à 3 743 cm^{-1} observée avec l'hectorite-Ba déshydratée est probablement due aux groupes OH de l'hectorite perturbés par les cations Ba^{++}. Il y a, en effet, 7 p. 100 environ des cavités hexagonales occupées par un cation Ba^{++}. En outre, si l'on admet une répartition au hasard des ions F^-, OH^- et Ba^{++}, seulement la moitié de ces cavités hexagonales possède un groupe OH. Le petit nombre de groupes OH pouvant être perturbés est en rapport avec la faible intensité de la bande à 3 743 cm^{-1} comparée à celle située à 3 682 cm^{-1}.

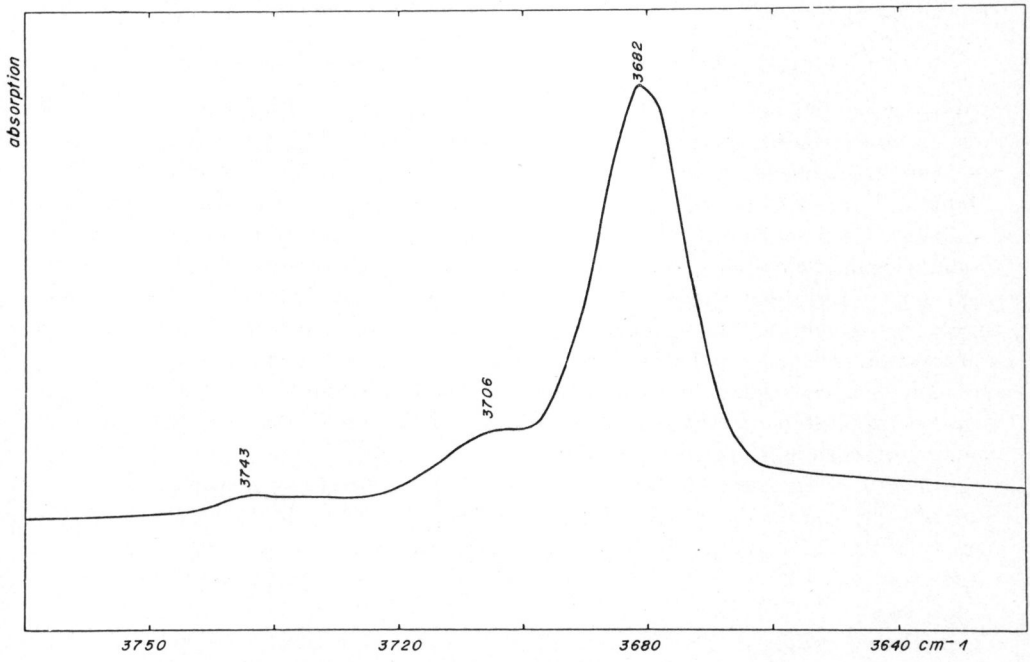


FIG. 44. — *Spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de l'hectorite-Ba complètement déshydratée*

Les modifications spectroscopiques résultant de l'hydratation et de la déshydratation de l'hectorite sont identiques à celles décrites pour la sépiolite. Dans le cas de l'hectorite où 15 p. 100 seulement des cavités hexagonales peuvent être occupées par des cations monovalents, la plus grande partie des groupes OH est soumise à

des perturbations semblables à celles que l'on observe avec la sépiolite. Lorsque l'argile est hydratée, un proton de l'eau perturbe ces hydroxyles. Cette perturbation des groupes OH de constitution de l'hectorite par des protons de l'eau adsorbée est tout à fait compatible avec la direction des groupes OH_a et OH'_a, perpendiculaires au plan (*a*, *b*) du feuillet de l'argile.

L'apparition d'un point isobestique (fig. 43), après soustraction du fond et superposition des spectres de vibration de valence des hydroxyles du réseau, obtenus pour des teneurs en eau différentes de l'argile, indique l'existence d'un équilibre entre l'ensemble des groupes OH perturbés et non perturbés (Chaussidon, 1970). Le spectre des hydroxyles de l'hectorite étant formé de deux bandes, on devrait observer non pas un, mais deux points isobestiques. Le fait de ne pas observer de point isobestique au niveau de la bande à plus haute fréquence résulte, probablement, d'un mauvais tracé du fond qui peut être profondément modifié par l'effet Christiansen (Prost, 1973 *b*).

L'estimation quantitative des termes de cet équilibre, c'est-à-dire du nombre des groupes OH perturbés sur le nombre total de groupes OH, doit fournir une estimation de la fraction de l'aire de la surface qui est recouverte par de l'eau. C'est cette remarque que nous avons mise à profit pour déterminer la fraction de l'eau adsorbée effectivement en contact avec la phase solide.

4. — *Interactions des molécules d'eau adsorbées avec le réseau de l'argile*

Les minéraux que nous avons étudiés (attapulgite, sépiolite et hectorite) ont, dans certaines conditions d'hydratation, leurs hydroxyles de constitution perturbés par l'eau. Le déplacement de fréquence change de sens suivant la nature di ou trioctaédrique du minéral (tabl. 10). Ce type d'interaction n'existe pas avec toutes les argiles. Nous ne l'avons pas observé avec un échantillon de saponite et il ne se produit rien de semblable au cours de la déshydratation de la vermiculite (Fernandez *et al.*, 1970). Dans cette dernière expérience, la fraction des groupes OH de constitution, non perturbée par les cations compensateurs, conserve la même fréquence d'absorption quelque soit l'état d'hydratation de l'argile. Ces deux échantillons se distinguent de ceux que nous avons étudiés par la localisation des déficits de charge positive qui ne sont pas situés dans la couche octaédrique (hectorite), mais dans la couche tétraédrique (saponite, vermiculite).

Farmer et Russell (1971) ont montré que l'eau adsorbée sur ces échantillons contracte des liaisons hydrogène avec les atomes d'oxygène de la surface appartenant à des tétraèdres où les ions Si^{++++} ont été remplacés par des ions Al^{+++}. Ce résultat est tout à fait en accord avec ce que nous avons montré pour l'eau adsorbée sur la natrolite.

L'absence de perturbation des hydroxyles de constitution par l'eau adsorbée, dans le cas des minéraux dont le déficit de charge positive est localisé dans la couche tétraédrique (saponite, vermiculite) doit, par conséquent, être attribuée au fait que les groupes OH de l'eau adsorbée contractent des liaisons hydrogène avec les atomes d'oxygène de la surface. Par contre, l'existence d'une perturbation des groupes OH de constitution, dans le cas des minéraux dépourvus de déficit de charge positive (attapulgite, sépiolite) ou qui possèdent un déficit de charge positive localisé dans la couche octaédrique (hectorite), montre que les hydroxyles des molé-

cules d'eau adsorbées sont dirigés vers le centre des cavités hexagonales. Cette orientation est indépendante de la nature di ou trioctaédrique du minéral. Il n'y a pas dans ces conditions formation de liaison hydrogène entre l'eau et les atomes d'oxygène de la surface. Il existe par conséquent une différence fondamentale dans la nature des interactions de l'eau adsorbée avec les atomes d'oxygène de la surface de l'argile, suivant la localisation du déficit de charge positive.

5. — *Détermination de la fraction de l'eau adsorbée en contact avec la phase solide*

L'interaction de l'eau adsorbée avec le réseau de l'argile se traduit en particulier par la perturbation des hydroxyles de constitution. Cette perturbation est utilisée pour estimer la fraction de l'aire de la surface qui est recouverte par l'eau. En effet chaque hydroxyle perturbé implique la présence d'une molécule d'eau à l'aplomb de la cavité hexagonale correspondante. En outre la connaissance, pour un espacement d_{001} donné. de l'arrangement des molécules d'eau, dans l'espace interlamellaire, permet le calcul de la quantité d'eau adsorbée entre les feuillets. Par différence, on peut en déduire la quantité d'eau adsorbée sur les surfaces externes. L'intérêt de cette approche réside dans le fait qu'elle peut être effectuée pour différentes teneurs en eau de l'argile.

L'arrangement des molécules d'eau à l'état monocouche, proposé par MAMY (1968) pour la montmorillonite, s'adapte au cas de l'hectorite (fig. 45). C'est précisément l'orientation des groupes O—H_a de l'eau adsorbée, suivant une direction

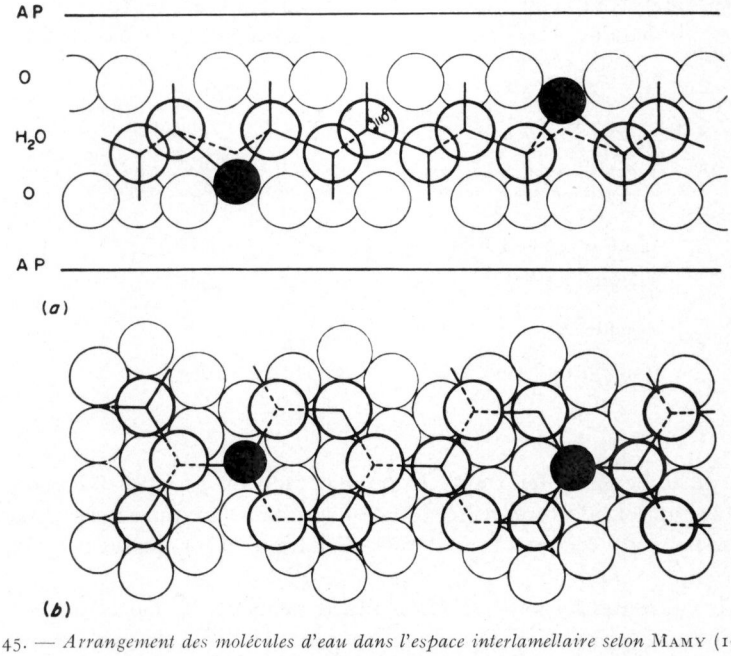


FIG. 45. — *Arrangement des molécules d'eau dans l'espace interlamellaire selon* MAMY (1968)
a : vue de côté
b : vue de dessus.

perpendiculaire au plan (*a*, *b*) du feuillet, qui provoque la perturbation observée au niveau des hydroxyles de constitution du minéral. La réalisation d'un arrangement de ce type implique seulement une molécule d'eau à l'aplomb de chaque cavité hexagonale. Le film ainsi formé est continu car toutes les molécules d'eau contractent au moins une liaison hydrogène. En admettant une répartition au hasard des ions F^- et OH^-, le pourcentage de groupes OH perturbés est proportionnel au pourcentage de l'aire de la surface recouverte par l'eau. Le problème consiste, par conséquent, à déterminer le pourcentage de groupes OH perturbés.

Le spectre de vibration de valence des hydroxyles de constitution de l'hectorite est formé de deux bandes qui se déplacent de 10 cm^{-1}, en direction des hautes fréquences, quand l'argile s'hydrate. En conséquence, le spectre des hydroxyles correspondant à un état d'hydratation intermédiaire est formé de 4 bandes. Le problème revient à décomposer le spectre pour déterminer l'intensité de chacune des 4 bandes élémentaires.

L'expérience consiste à obtenir le spectre de vibration de valence des hydroxyles de l'hectorite pour des teneurs en eau différentes de l'argile. La teneur en eau de l'argile est déterminée à l'aide du montage représenté par la figure 4 de l'annexe. Afin de ne pas être gêné par le spectre de H_2O, l'échantillon est préalablement deutéré. Il reste cependant une bande due à OH de HOD. Cette bande complique le tracé du fond. On s'assure cependant de son exactitude en mesurant l'aire du spectre qui doit rester constante, quelle que soit la teneur en eau de l'hectorite.

La décomposition est effectuée sur ordinateur en utilisant un programme d'ajustement basé sur la méthode des moindres carrés. On a supposé que le profil des bandes est gaussien. Les fréquences correspondant à chacune des bandes sont rassemblées dans le tableau 12. La largeur à mi-hauteur de 12 cm^{-1} est la même pour toutes les bandes. Les calculs ont été effectués dans le cas de l'hectorite-Ba Na et Cs.

TABLEAU 12

Fréquence en cm^{-1} des bandes composantes élémentaires du spectre de vibration de valence des hydroxyles de l'hectorite

Hectorite-Ba	3 682	3 692	3 706	3 716
Hectorite-Na	3 682	3 692	3 706	3 716
Hectorite-Cs	3 685	3 695	3 709	3 719

On a pratiquement déterminé le pourcentage de groupes OH non perturbés en faisant le rapport de l'intensité de la bande basse fréquence des hydroxyles de constitution pour une teneur en eau donnée de l'argile et lorsqu'elle est complètement déshydratée.

Dans le cadre des hypothèses faites précédemment, le pourcentage des groupes OH perturbés est proportionnel au pourcentage de l'aire de la surface recouverte par l'eau.

La figure 46 représente le pourcentage de l'aire de la surface qui est recouverte par l'eau. Ces pourcentages sont très différents selon la nature du cation compensateur. Si on considère la teneur en eau de 10 p. 100, qui correspond, pour les trois échantillons étudiés au début du premier palier des courbes d'ouvertures (fig. 28), et à la quantité d'eau nécessaire pour réaliser l'état monocouche suivant l'arrangement proposé par MAMY (1968), seulement le 1/4 de la surface est recouvert par de l'eau dans le cas de l'hectorite-Cs, le 1/3 s'il s'agit de l'hectorite-Na et les 2/3 pour l'hectorite-Ba. Ces chiffres sont la conséquence d'une répartition très différente de l'eau sur la surface suivant la nature du cation qui compense la charge de l'argile. On note, en particulier, une répartition plus homogène des molécules d'eau sur la surface de l'hectorite-Ba que sur la surface de l'hectorite-Cs. Ceci est dû à l'énergie d'hydratation élevée des ions Ba^{++}, probablement solvatés par un plus grand nombre de molécules d'eau que les ions Cs^{+}. On remarque l'analogie de comportement de l'hectorite-Na, avec l'hectorite-Cs aux faibles teneurs en eau et avec l'hectorite-Ba aux teneurs en eau plus élevées.

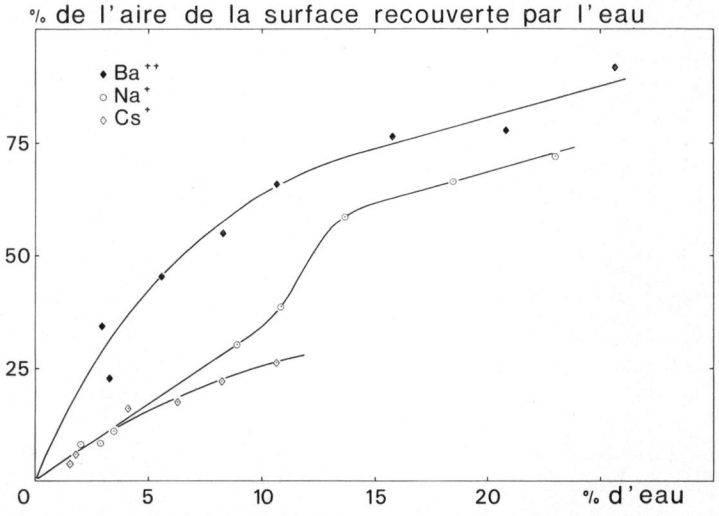


FIG. 46. — *Courbes représentant l'aire de la surface recouverte par l'eau en fonction de la teneur en eau*

Le calcul du pourcentage de molécules d'eau engagées dans des cavités hexagonales, que nous considérons comme l'eau qui est en contact avec la surface, repose sur la démarche suivante. Il y a 4 cavités hexagonales par maille (2 sur chaque face). En outre, le poids de la maille d'hectorite M est calculé en appliquant la formule qui suit :

$$M = 752{,}5 + \frac{0{,}58}{z} \times Y$$

où Y désigne la masse d'une môle de cation échangeable et z sa valence.

Dans le cas où X p. 100 des groupes OH de constitution sont perturbés par de l'eau, on a X molécules d'eau pour $\frac{100}{4} = 25$ mailles d'hectorite. En conséquence,

la fraction de l'eau en contact avec la surface exprimée en g d'eau pour 100 g d'argile est :

$$\frac{X \times 18}{25 \times M} \times 100$$

où X : représente le pourcentage de groupes OH perturbés,

M : est la masse de la maille d'hectorite.

La figure 47 représente le pourcentage d'eau non en contact avec la surface du solide en fonction de la teneur en eau du minéral.

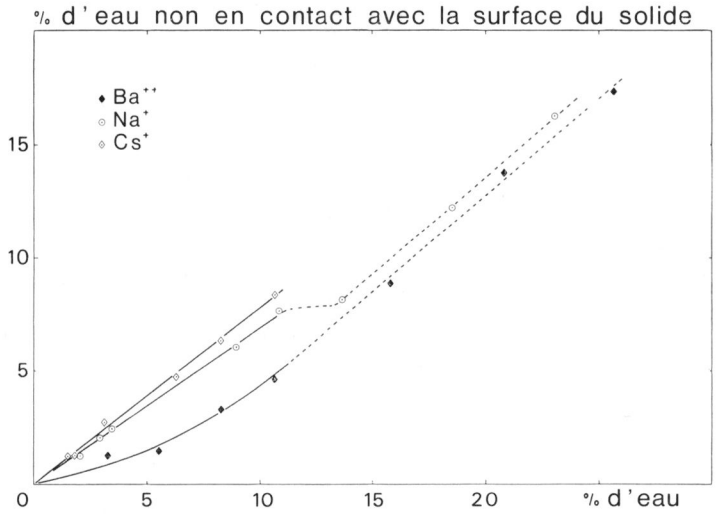


FIG. 47. — *Courbes représentant le pourcentage de l'eau qui n'est pas en contact avec la surface du solide en fonction de la teneur en eau du minéral*

Plaçons-nous, maintenant, dans le cas où l'espacement des feuillets ne dépasse pas celui correspondant à la monocouche telle que l'a décrite MAMY (1968) (fig. 45). On peut considérer que cette condition est réalisée tant que la teneur en eau de l'argile ne dépasse pas 10 p. 100.

Le modèle proposé par MAMY (1968) pour la monocouche, implique la présence d'une molécule d'eau en face de chaque cavité hexagonale. Cette remarque nous amène à considérer le pourcentage d'eau en contact avec la surface de l'argile comme la partie de l'eau qui est adsorbée dans les espaces interlamellaires et qui est à l'aplomb des cavités hexagonales des surfaces externes.

En conséquence, pour des teneurs en eau inférieures à 10 p. 100, le pourcentage de l'eau qui n'est pas en contact avec l'argile est effectivement répartie sur les surfaces externes.

La connaissance de la surface externe S de l'hectorite, déterminée par la méthode BET, permet alors le calcul du nombre de couches d'eau réparties sur les surfaces externes.

Dans le cas où l'hectorite contient P p. 100 d'eau, Q p. 100 ne sont pas en contact avec la surface de l'argile. Si on admet, par ailleurs, que le taux de recouvrement

d'une couche monomoléculaire d'eau est de 66 m²/mmole, le nombre de couches d'eau, réparties sur les surfaces externes et correspondant à la fraction de l'eau non en contact avec la surface de l'argile, est donné par la formule suivante :

$$\frac{Q \times 1\,000 \times 66}{18 \times S \times 100}$$

où Q : est le pourcentage d'eau non en contact avec la surface de l'argile,
S : est la surface externe de l'argile.

Pour tenir compte de l'eau située à l'aplomb des cavités hexagonales des surfaces externes, il faut ajouter 0,5 aux chiffres donnés par la formule précédente.

Le tableau 13 donne le nombre de couches d'eau réparties sur les surfaces externes de l'hectorite-Ba, Na et Cs contenant 10 p. 100 d'eau.

TABLEAU 13

Nombre de couches d'eau réparties sur les surfaces externes de l'hectorite contenant 10 p. 100 d'eau

Hectorite	S (en m²/g)	Q (%)	$\frac{Q \times 1\,000 \times 66}{18 \times S \times 100}$	Nombre de couches d'eau réparties sur les surfaces externes
Ba	72	4,4	2,2	2,7
Na	100	6,9	2,5	3
Cs	130	7,8	2,2	2,7

Le changement de pente brutal, observé sur la figure 47 pour l'hectorite-Na entre 11 et 14 p. 100 d'eau, correspond à ce qu'on appelle généralement la phase de remplissage des espaces interlamellaires. Ce domaine d'hydratation coïncide avec la fin du premier palier des courbes d'ouverture.

Ces courbes renseignent sur les mécanismes de l'hydratation de l'hectorite, en particulier, sur la localisation de l'eau adsorbée. Des études actuellement en cours devraient nous permettre de décrire ces mécanismes pour la totalité du domaine d'hydratation étudié.

CHASSIN (1975), à partir de l'étude de l'adsorption de l'eau sur une montmorillonite-Ca, dont une fraction de plus en plus faible de la surface totale est recouverte par un polyéthylène glycol, détermine par extrapolation à un système qui ne contient pas de matière organique, la fraction de l'eau qui n'est pas en contact avec l'argile. Les valeurs trouvées sont en accord avec nos résultats.

CONCLUSION

Les résultats obtenus au cours de ce travail montrent que les interactions de l'eau adsorbée avec l'argile confèrent à l'ensemble du système des propriétés qui ne se rencontrent pas dans les phases solide, liquide ou gazeuse, isolées.

Les modifications exercées par l'eau adsorbée sur le réseau des minéraux argileux se manifestent de différentes façons. Certaines, comme l'hydrolyse, qui correspond à la libération de cations provenant de la couche octaédrique, sont irréversibles. Les expériences effectuées montrent toutefois, que les propriétés spectroscopiques de l'eau, au niveau d'analyse où nous nous sommes placés, ne sont pas perturbées par ce phénomène. D'autres ont un caractère réversible et résultent d'une interaction de l'eau adsorbée avec certains éléments du réseau. C'est le cas des perturbations observées sur les fréquences de vibration des groupements Si—O ou OH du réseau, lorsque la teneur en eau de l'argile varie.

Réciproquement, les modifications exercées par la phase argileuse (réseau + cations compensateurs) sur l'eau adsorbée se manifestent de plusieurs façons, soit sur les propriétés physico-chimiques de l'eau qui acquiert notamment un pK inférieur à celui de l'eau liquide, soit sur l'arrangement des molécules d'eau.

Seuls deux aspects de ces questions ont été abordés. Le premier traite de la structure de l'eau adsorbée et le second, des perturbations exercées par l'eau adsorbée sur les hydroxyles de constitution de l'argile.

Ce travail a permis de montrer que la structure de l'eau au contact d'une surface argileuse dépend de deux facteurs principaux : le réseau du minéral et les cations compensateurs. Ces deux facteurs interviennent avec des poids différents suivant la teneur en eau du minéral. Pour des échantillons d'hectorite-Li, Mg, Ca, Sr et Ba, contenant de faibles teneurs en eau, la plus grande partie des molécules d'eau adsorbées solvate les cations compensateurs. Dans ces conditions, l'arrangement des molécules d'eau dépend essentiellement de ces derniers. Ce n'est plus le cas lorsque les cations compensateurs sont Na^+, K^+ ou Cs^+, ou lorsque la teneur en eau est forte (20 p. 100). La structure de l'eau dépend alors, essentiellement, du réseau de l'argile.

La spectroscopie infrarouge a permis l'identification de deux grands types de molécules d'eau :

a) les molécules qui ont la symétrie C_s, car un seul de leurs hydroxyles est engagé dans une liaison hydrogène. L'hydroxyle qui ne contracte pas de liaison hydrogène est à l'origine, sur les systèmes que nous avons étudiés, de l'absorption située vers 3 560 et 3 630 cm^{-1}. La bande à 3 560 cm^{-1} est due aux groupes OH des molécules d'eau de solvatation des cations compensateurs ou de bords de feuillets, et la bande à 3 630 cm^{-1}, aux groupes OH des molécules d'eau qui sont en contact avec la surface de l'argile mais qui ne solvatent pas de cations.

L'existence de l'absorption située à 3 560 et 3 630 cm^{-1} est la différence la plus évidente qui existe entre le spectre de l'eau adsorbée sur l'argile et le spectre de l'eau liquide.

b) les molécules d'eau qui ont la symétrie C_{2v}, car leurs deux hydroxyles contractent des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau voisines. Ces molécules d'eau ne sont pas en contact avec la surface.

L'identification de ces deux grands ensembles de molécules d'eau n'est pas simple En particulier, les conditions requises pour l'emploi du tableau de SEIDL *et al* (1969) ne sont pas, pour un état de l'eau donné, toutes réalisées. C'est le cas des systèmes déshydratés par mise sous vide (sépiolite, hectorite-Ca). Ces difficultés sont dues d'une part, à la mauvaise résolution des bandes d'absorption de l'eau et, d'autre part, à la coexistence de plusieurs types de molécules d'eau sur la surface de l'argile. En effet, en dehors des stades ultimes de déshydratation, il n'existe pas de système pour lequel la totalité de l'eau adsorbée est dans un même état. Ceci est bien illustré par les courbes représentant le pourcentage de l'eau qui n'est pas en contact avec la surface du solide, en fonction de la teneur en eau de l'argile. Ces courbes montrent que les deux grands ensembles de molécules d'eau apparaissent dès les plus faibles humidités relatives. Leur importance relative, pour une pression partielle de vapeur d'eau donnée, est fonction de la nature du cation compensateur. En conséquence, lorsque nous identifions un état de l'eau, cela peut ne concerner qu'une fraction de l'eau adsorbée.

Le second aspect, qui traite des perturbations exercées par l'eau adsorbée sur les fréquences de vibration de valence des groupes OH de constitution, nous a permis, connaissant l'arrangement des molécules d'eau dans les espaces interlamellaires, de tenter d'estimer la fraction de l'eau fixée entre les feuillets et à l'extérieur des cristallites.

Ce calcul n'a été mené à bien que dans le cas de l'hectorite-Ba, Na et Cs, et pour des teneurs en eau inférieures ou égales à celles qui donnent la monocouche. Le cas de l'hectorite saturée par d'autres cations et hydratée à plusieurs couches, fait l'objet d'une étude actuellement en cours.

C'est, par conséquent, grâce à l'étude simultanée des perturbations exercées par l'eau adsorbée sur l'argile et réciproquement, par l'argile sur l'eau adsorbée, que nous avons pu avancer dans la connaissance du mécanisme de la rétention de l'eau par les argiles.

Cette approche nous a conduit, en outre, à reconsidérer certains éléments de la structure des minéraux. C'est ainsi, qu'à partir d'observations sur les interactions des molécules d'eau avec le réseau de l'attapulgite, nous avons été amené à rejeter l'idée proposée par GARD et FOLLETT (1968) d'un minéral formé de lattes de différentes dimensions.

Nous avons surtout porté notre attention sur la première couche de molécules d'eau qui est en contact avec la surface de l'argile. Or les spectres OD de HOD de l'hectorite-Na ou Li contenant 20 p. 100 d'eau montrent que les molécules d'eau présentes sur ces systèmes hydratés contractent des liaisons hydrogène plus faibles que dans l'eau liquide. Ces résultats traduisent incontestablement un effet de la surface sur la structure de l'eau bien au-delà de la première couche. Il reste cependant à définir la nature de ces effets et les distances auxquelles ils restent sensibles.

Enfin, la géométrie très particulière des systèmes que nous avons étudiés devrait pouvoir être mise à profit pour aborder certains aspects de la structure de l'eau dans les électrolytes, en particulier pour mieux saisir l'effet des cations.

Reçu pour publication en juillet 1975.

SUMMARY

STUDY OF CLAY HYDRATION : THE WATER-MINERAL INTERACTIONS AND THE WATER RETENTION MECHANISM.
II. — STUDY OF A SMECTITE (HECTORITE)

The methods used for studying the water present in natrolite, attapulgite and sepiolite are applied to the case of the water adsorbed on a smectite : hectorite. Several states of the water are defined during the dehydration of the mineral. Studying, for each of these states, the structure of the film of water and the interactions of the adsorbed water molecules with the structural OH groups of clay led us to :

1) propose a model for the arrangement of the water molecules in the interlamellar space of the one-layered hydrous systems,

2) calculate the percentage of the mineral's surface area actually covered by water, for various clay water contents,

3) estimate, for the single-layered state only, the quantities of water adsorbed on the clay's internal and external surfaces.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG ÜBER DIE HYDRATATION VON TONEN : WECHSELWIRKUNGEN WASSER-MINERAL UND MECHANISMUS DER WASSERZURÜCKHALTUNG.
II. — UNTERSUCHUNG ÜBER EINEN SMECTIT (HECTORIT)

Die für die Untersuchung des vorhandenen Wassers in Natrolith, Attapulgit und Sepiolith gebrauchte Verfahrenstechnik wird für den Fall des in einem Smectit-Hectorit adsorbierten Wassers verwendet. Mehrere Lagen des Wassers werden im Lauf der Dehydratation des Minerals definiert. Die Untersuchung der Struktur des Wasserfilms und der Wechselwirkungen der adsorbierten Wassermoleküle mit den OH-Gruppen des Tongerüsts für jeden einzelnen dieser Zustände hat uns zu folgendem geführt :

1) ein Modell der Anordnung der Wassermoleküle in den interlamellären Räumen des Systems in einer Ebene vorzuchlagen,

2) für verschiedene Wassergehalte des Tons den prozentualen Anteil der Mineraloberfläche, die wirklich von Wasser bedeckt ist, zu berechnen,

3) für die Systeme, die nicht über den ein-lagigen Zustand hinausgehen, die Mengen des auf den inneren und äusseren Oberflächen des Tons adsorbierten Wassers zu schätzen.

РЕЗЮМЕ

Изучение оводнения глин : взаимодействие вода — минерал и механизмы удержания воды.

Р. ПРСТ

Методология, применявшаяся при изучении воды в натролите, аттапульгите и сепиолите, применялась также и ве случа определения воды адсорбированной на одном из смектитов — гекторите. При обезвожи-

вании минерала насчитывается несколько состояний воды. Изучение каждого из этих состояний структуры водной пленки, и взаимодействия молекул адсорбированной воды с группами OH состава глины заставляет :

1. Предложить модель размещения молекул воды в межламеллярном пространстве оводненных однослойных систем;

2. Рассчитать процент повехности минерала действительно покрытой водой, при разных содержаниях этой воды;

3. Оценить для систем, находящихся в однослойном состоянии, количества воды адсорбированной на внутренних и внешних поверхностях глины.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages généraux

BRUNAUER S., 1945. *The adsorption of gases and vapors*. Vol. 1. Physical adsorption. 511 p., Princeton University, Princeton.

FRIPIAT J., CHAUSSIDON J., JELLI A., 1971. *Chimie-physique des phénomènes de surface. Applications aux oxydes et aux silicates*. 387 p., Masson, Paris.

ZUNDEL G., 1969. *Hydration and intermolecular interaction*, 310 p., Academic Press, New York, Londres.

Articles

BELLAMY L. J., BLANDAMER M. J., SYMONS M. C. R., WADDINGTON D., 1971. Infra-red spectra of salt hydrates. *Trans. Faraday Soc.*, **67**, 3435-3440.

CALVET R., 1972. *Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs*. 141 p., Thèse Fac. Sci. Paris. *a*) Première partie : *Ann. agron.*, 1973, **24** (1), 73-133. *b*) Deuxième partie : *Ann. agron.*, 1973, **24** (2), 135-217.

CHASSIN P., 1975. *Étude des interactions montmorillonite calcique-eau-diols : hydratation des complexes montmorillonite-diols*. 100 p., Thèse Fac. Sci. Paris.

CHAUSSIDON J., 1970. Stretching frequencies of structural hydroxyls of hectorite and K-depleted phlogopite as influenced by interlayer cation and hydration. *Clays and Clay miner.*, **18**, 139-149.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69**, 421-432.

FARMER V. C., RUSSEL J. D., 1971. Interlayer complexes in layer silicates. The structure of water in lamellar ionic solutions. *Trans. Faraday Soc.*, **67**, 2737-2749.

FARMER V. C., 1974. In FARMER V. C. *The infrared spectra of minerals*. The layer silicates, 331-358, Mineralogical Society, Londres.

FERNANDEZ M., SERRATOSA J. M., JOHNS W. D., 1970. Perturbation of the stetching vibration of OH groups in phyllosilicates by the interlayer cations. *Proc. Reunion hispano-belga de minerales de la arcilla, Madrid*, 163-172.

FIFER R. A., SCHIFFER J., 1971. Intermolecular coupling of water molecules in copper chloride dihydrate. *J. Chem. Phys.*, **54**, 5097-5102.

GREENEWALT C. H., 1925. Partial pressure of water out of aqueous solutions of sulfuric acid. *Ind. Eng. Chem.*, **17**, 522-523.

GREINACHER E., LÜTTKE W., MECKE R., 1955. Infrarotspektroskopische Untersuchungen an Wasser, gelöst in organischen Lösungsmitteln. *Z. Elektrochem.*, **59**, 23-31.

HENDRICKS S. B., NELSON R. A., ALEXANDER L. T., 1940. Hydration mechanism of the clay mineral montmorillonite saturated with various cations. *J. Am. Chem. Soc.*, **62**, 1457-1464.

LE RENARD J., MAMY J., 1971. Étude de la structure des phases hydratées des phlogopites altérées par des projections de Fourier monodimensionnelles. *Bull. Groupe fr. Argiles*, t. XXIII, 119-127.

LOW P. F., WHITE J. L., RAVINA I., 1971. Changes in *b* dimension of Na-montmorillonite with interlayer swelling. *Nature Phys. Sci.*, **230**, 159-160.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite : propriétés diélectriques et structure du film d'eau*, 113 p., Thèse Fac. Sci. Paris. *a*) Première et deuxième parties : *Ann. agron.*, 1968, **19** (2), 175-246. *b*) Troisième partie : *Ann. agron.*, 1968, **19** (3), 251-292.

MAMY J., GAULTIER J. P., 1973. Applications des mesures de conductivité électrique à l'étude de l'eau fixée par des phyllites gonflantes. *Bull. Groupe fr. Argiles*, t. XXV, 43-51.

MÉRING J., OBERLIN A., 1971. In GARD J. A., *The electron-optical investigation of clays*. The smectites, 193-229, Mineralogical Society, Londres.

MOONEY R. W., KEENAN A. G., WOOD L. A., 1952. Adsorption of water vapor by montmorillonite. I. Heat of desorption and application of BET theory. *J. Am. Chem. Soc.*, **74**, 1367-1371. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-Ray diffraction. *J. Am. Chem. Soc.*, **74**, 1371-1374.

PEZERAT H., MÉRING J., 1967. Recherches sur la position des cations échangeables et de l'eau dans les montmorillonites. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. **265**, série D, 529-532.

PROST R., 1972. Spectre infrarouge de l'eau adsorbée sur l'hectorite saturée par différents cations à des teneurs en eau variables. *Proc. Int. Clay Conf.*, Madrid, 529-535.

PROST R., 1973 *a*. Spectre infrarouge de l'eau présente dans l'attapulgite et la sépiolite. *Bull. Groupe fr. Argiles*, XXV, 53-63.

PROST R., 1973 *b*. The influence of the Christiansen effect on i.r. spectra of powders. *Clays and Clay miner.*, **21**, 363-368.

PROST R., 1974. Spectre i.r. de l'eau présente dans la natrolite. *Spectrochim. Acta*, **30** A, 1855-1859.

RUSSELL J. D., FARMER V. C., 1964. Infra-red spectroscopic study of the dehydration of montmorillonite and saponite. *Clay Miner. Bull.*, **5**, 443-464.

SAUMAGNE P., JOSIEN M. L., 1958. Vibrations de valence des molécules H_2O, D_2O et HDO dans les solvants organiques. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 813-820.

SAUMAGNE P., 1970. Comparison between two models of complexed water : open water dimer and I-I complexed water. *J. Chem. Phys.*, **53**, 3768.

TCHOUBAR C., RAUTUREAU M., CLINARD C., RAGOT J. P., 1973. Technique d'inclusion appliquée à l'étude des silicates lamellaires et fibreux. *J. Microscopie*, **18**, 147-154.

WHITE J. L., JELLI A. N., ANDRE J. M., FRIPIAT J. J., 1967. Perturbation of OH groups in decationated Y-zeolites by physically Adsorbed Gases. *Trans. Faraday Soc.*, **63**, 461-475.

ANNEXE

DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX POUR L'ÉTUDE DES ARGILES PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE

L'étude des argiles par spectroscopie infrarouge pose le problème de la préparation et du conditionnement des échantillons en température et en teneur en H_2O ou D_2O. Les échantillons que nous avons utilisés se présentent sous deux formes :

1° Les dépôts. Ils sont obtenus par évaporation lente d'une suspension d'argile sur un support transparent au rayonnement infrarouge (fenêtre ou grille métallique).

2° Les films autoporteurs. Nous les obtenons de même, par évaporation lente d'une suspension d'argile, mais sur du « mylar ». Le dépôt est ensuite séparé de son support, en faisant glisser l'ensemble sur une arête vive, comme indiqué sur la figure 1.

Les dépôts de minéraux phylliteux sont suffisamment orientés pour permettre d'étudier le caractère dichroïque des bandes d'absorption en orientant l'échantillon par rapport à la direction du faisceau incident.

La diversité des problèmes posés est telle qu'il est difficile de trouver sur le marché

des montages adaptés à l'étude des argiles par spectroscopie infrarouge. Pour cette raison, nous avons dû réaliser nous-mêmes les différents dispositifs utilisés lors de l'étude de l'eau adsorbée sur les argiles.

Ces montages ont été conçus pour des appareils Beckman IR_7 et IR_{12}, dont les différents compartiments sont traversés par un courant d'air sec.

Chacun des dispositifs expérimentaux que nous avons utilisés comporte une unité de base qui est la cellule sur laquelle s'adaptent différents porte-échantillon ayant chacun une fonction bien déterminée. Nous décrirons d'abord la cellule, puis chacun des porte-échantillon.

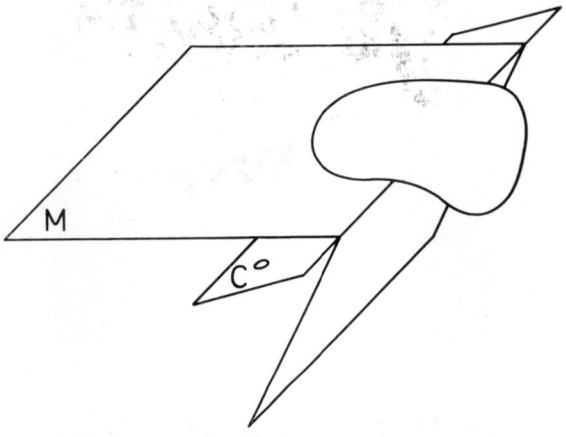


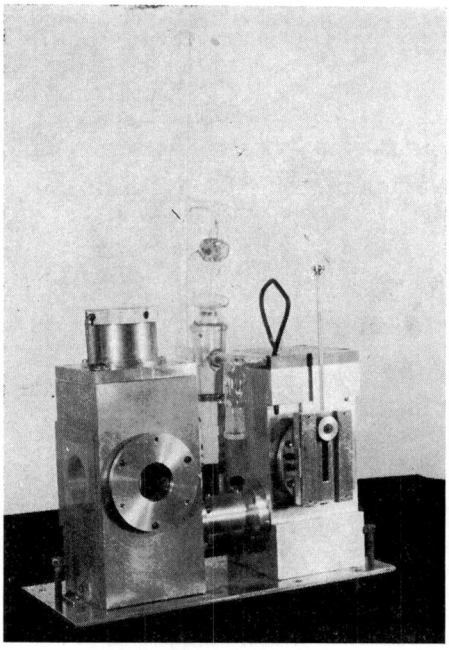
FIG. 1. — *Schéma montrant le procédé utilisé pour séparer le dépôt de son support*
M : feuille de plastique (Mylar)
C : lame de Cutter

La cellule (photo 1 et 2), est construite en duralumin. Les fenêtres sont en CaF_2 ou en KRS_5 selon le domaine spectral exploré. L'étanchéité au vide, entre les différents éléments constituant la cellule, est assurée par des joints toriques.

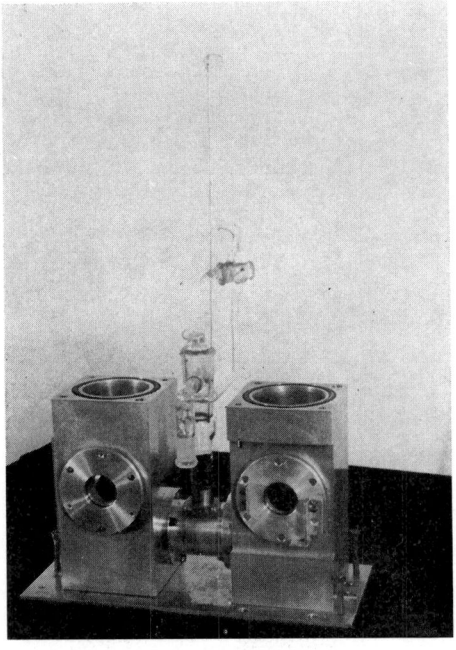
Cette cellule est constituée de deux parties identiques reliées entre elles par un cylindre creux, afin de ne pas déséquilibrer les faisceaux de mesure et de référence (même distance entre les fenêtres, même atmosphère). Du cylindre central part un dispositif en verre (raccord verre-métal Kovar) relié, grâce à un robinet à trois voies, d'une part au vide et d'autre part à une fiole pouvant contenir H_2O ou D_2O, des mélanges $H_2O + H_2SO_4$, en vue de fixer des humidités relatives, ou un produit organique quelconque dont la vapeur peut être mise en contact avec l'échantillon.

La cellule est solidement fixée au fond du compartiment échantillon et maintenue par l'intermédiaire de trois vis calantes. Sur la partie avant de la cellule a été ménagée une ouverture fermée par une plaque de verre collée à l'araldite, permettant de voir à l'intérieur du compartiment de mesure. Le compartiment référence est équipé d'un porte-peigne.

Sur cette unité de base que constitue la cellule s'adaptent les différents porte-échantillon décrits ci-dessous. Tous ces porte-échantillon permettent d'orienter le film ou le dépôt d'argile par rapport à la direction du faisceau incident.



1



2

PHOTOS 1 et 2. — *Ces photographies représentent deux vues différentes de la cellule*
Les dimensions de la plaque qui supporte la cellule sont de 300 × 128 mm

1. — *Porte-échantillon dont la rotation est assurée par un entraînement magnétique* (fig. 2)

Ce dispositif supprime le problème de la traversée étanche au vide, du couvercle de la cellule par un axe. Il permet l'étude du caractère dichroïque des bandes d'absorption.

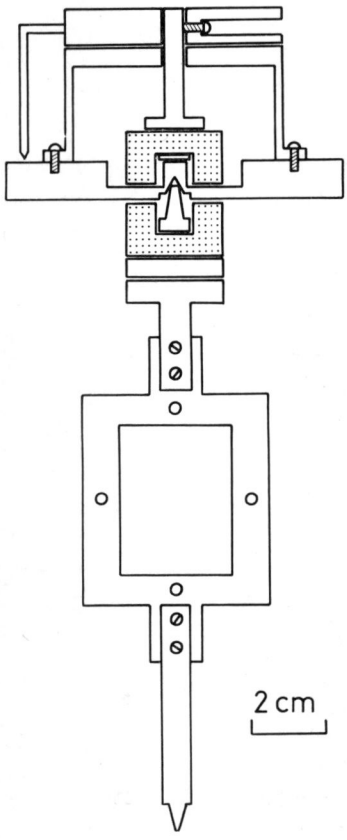


FIG. 2. — *Porte-échantillon à entraînement magnétique*

2. — *Porte-échantillon chauffant* (fig. 3)

Le chauffage se fait grâce à un fil de nichrome bobiné sur un cadre en mica dont les qualités mécaniques et isolantes sont excellentes. La résistance du fil de nichrome est de 106 ohm par mètre. La température est repérée avec un thermocouple chromel-alumel. Les différentes températures de chauffe sont obtenues en faisant varier la tension aux bornes de la résistance. Pour assurer l'étanchéité de la traversée des fils du termocouple et des fils d'alimentation de la résistance, nous avons noyé ces derniers dans l'araldite, qui est aussi un excellent isolant. Ce cadre chauffant permet d'atteindre des températures de l'ordre de 400°C. Les enregistrements ne sont faits que lorsque l'échantillon est revenu à la température du spectrographe.

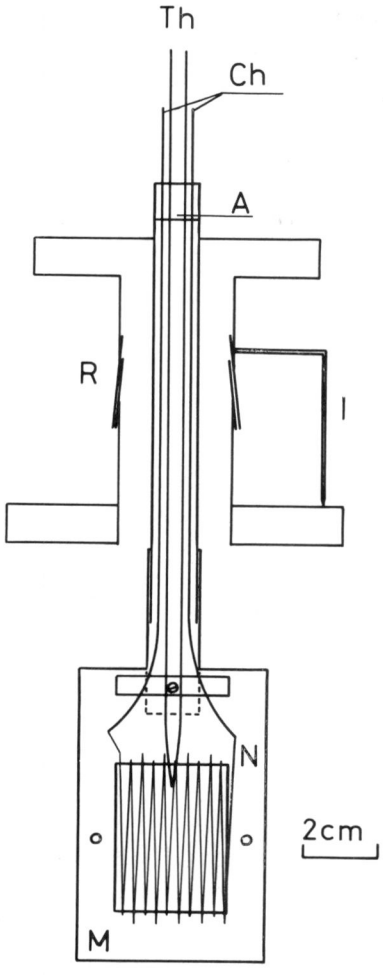


FIG. 3. — *Porte-échantillon chauffant*

Th : thermocouple chromel-alumel
Ch : alimentation du fil de nichrome
A : araldite
R : rôdage
I : index pour repérer l'orientation de l'échantillon dans le faisceau
M : mica
N : nichrome

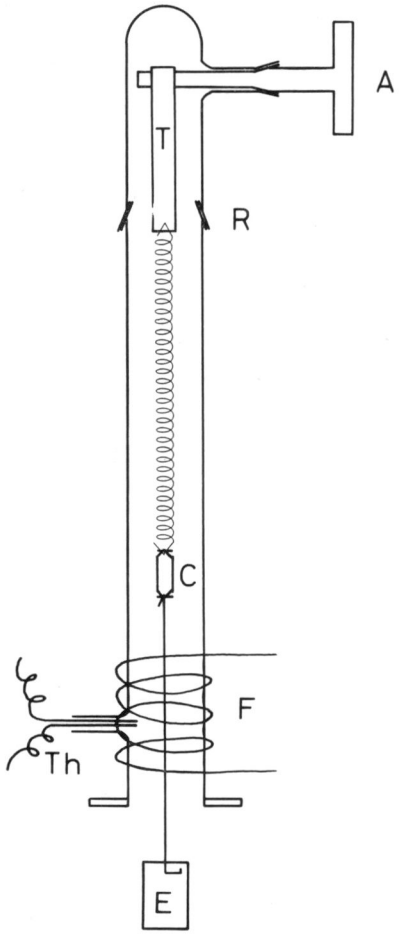


FIG. 4. — *Balance pour peser l'échantillon au cours de l'enregistrement*

T : ruban de téflon
F : résistance chauffante enroulée autour du tube de verre
Th : Thermocouple
E : échantillon

3. — *Balance pour peser l'échantillon au cours de l'enregistrement* (fig. 4)

Les différents éléments qui constituent le montage sont notés sur la figure 4. Ce dispositif permet :

a) d'amener, par l'intermédiaire de la clé A, l'échantillon E toujours à la même cote que l'on repère avec un cathétomètre au 1/100e, de marque Boutry ;

b) d'orienter le film E par rapport au faisceau, en tournant le rodage R ;

c) d'amener l'échantillon E au niveau d'un petit four F, dont la température de

chauffe (de 400°C) est limitée par la nature du verre constituant le tube. La température est repérée par un thermocouple Th.

L'orientation du film a été rendue possible en utilisant le ruban de téflon T et une petite croix en métal C qui interdit toute rotation des crochets, les uns par rapport aux autres.

La sensibilité des spirales de quartz utilisées (0,6 ou 0,7 mg/mm) permet d'obtenir des pesées à quelques dizièmes de mg près.

4. — *Porte-échantillon pour refroidir les films ou dépôts d'argile* (fig. 5 et 6)

Ce porte-échantillon s'adapte sur la cellule dans laquelle nous pouvons faire le vide qui élimine tout risque de condensation de la vapeur d'eau sur le porte-échantillon.

La figure 5 donne le schéma d'ensemble du dispositif permettant d'abaisser la température des échantillons.

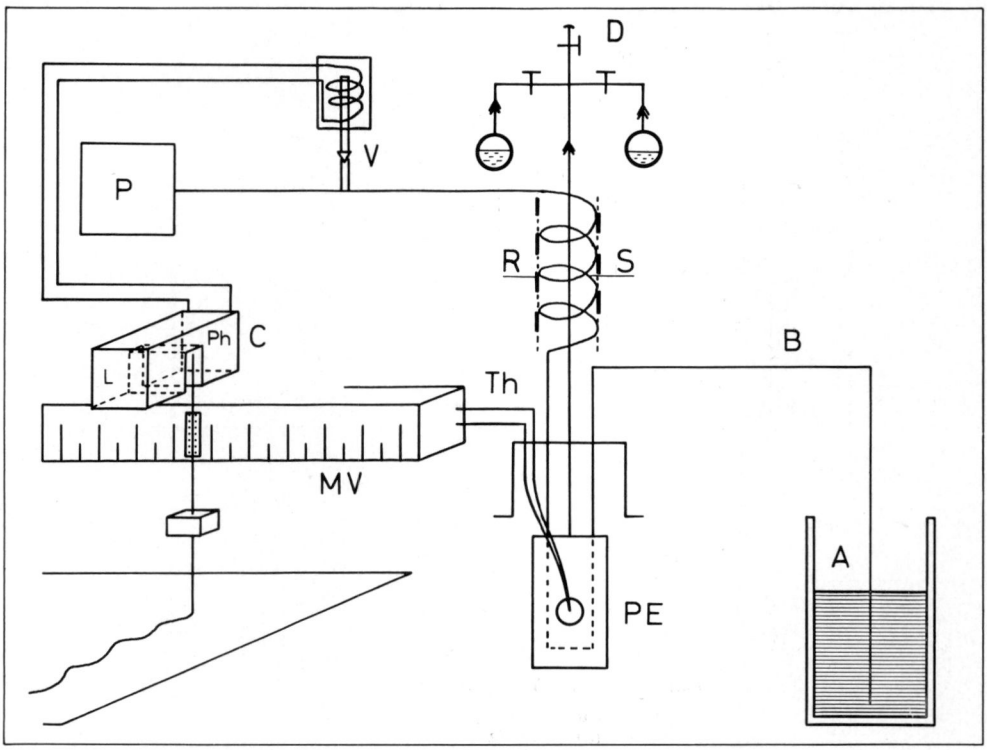


FIG. 5. — *Schéma d'ensemble du dispositif permettant d'abaisser la température des échantillons*

L'échantillon, placé entre deux fenêtres transparentes au rayonnement, peut être mis sous vide ou en contact avec une vapeur, grâce au dispositif en verre (D) qui surmonte le porte-échantillon PE.

L'abaissement de température s'obtient à l'aide d'une pompe à air P qui aspire, par l'intermédiaire d'un capillaire en cuivre B de 2 mm de diamètre, de l'azote liquide

contenu dans le Dewar A. Pour éviter de geler les membranes de la pompe à air, l'azote gazeux est réchauffé dans le serpentin en cuivre S sur lequel est bobinée une résistance R.

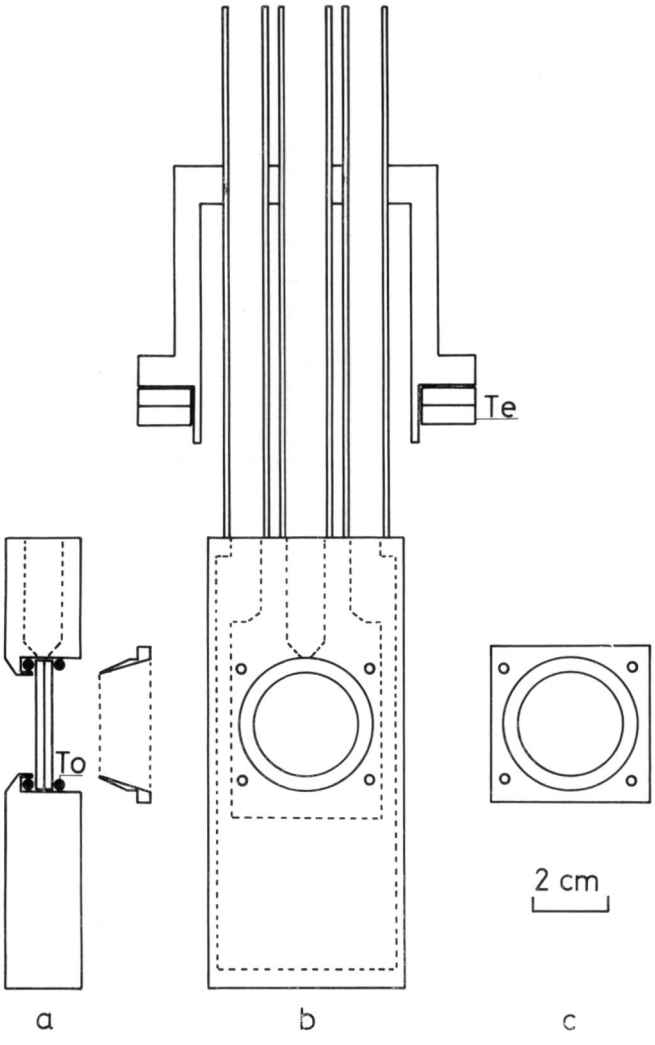
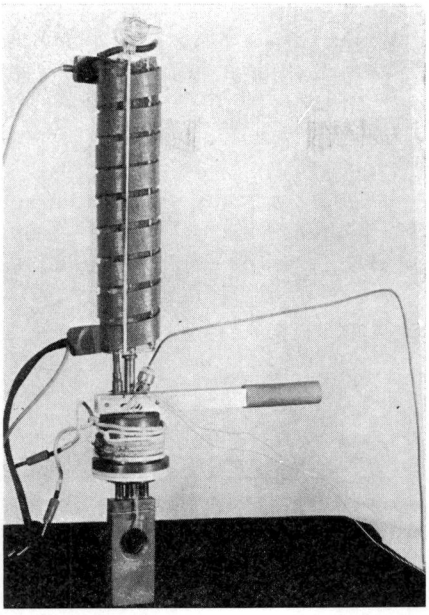
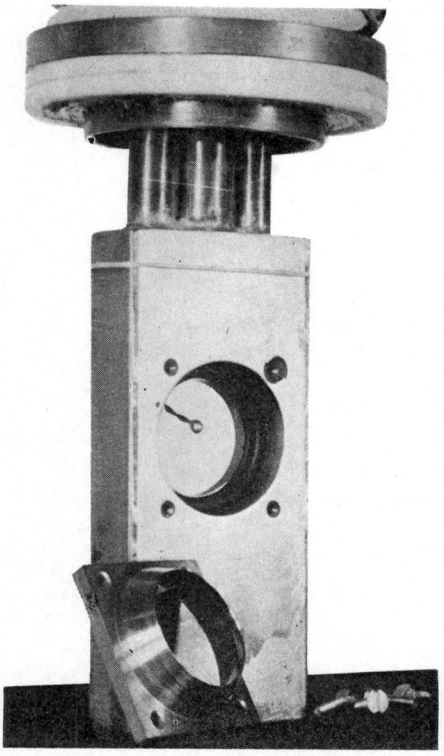


FIG. 6. — *Porte-échantillon pour refroidir les films ou dépôts d'argile*
a et *b* : coupes de la tête du porte-échantillon suivant deux plans perpendiculaires
c : vue de face de la pièce servant au blocage des fenêtres
Te : joints de téflon
To : joints toriques

La régulation en température se fait par l'intermédiaire du capteur C qui commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne V. Ce capteur, formé d'une lampe L et d'une cellule photo-résistante Ph alignées à l'aide de deux petits trous, est placé sur la graduation du millivoltmètre MV (Sefram type graphispot) correspondant à la



3



4

PHOTOS 3 et 4. — *Porte-échantillon pour refroidir les films ou dépôts d'argile*

tension fournie par le thermocouple Th quand la soudure a atteint la température désirée. Le passage de la plume devant le trou, provoque un obscurcissement de la cellule photorésistante et, par conséquent, la possibilité de commander l'ouverture ou la fermeture de la vanne suivant le sens de variation de la température. L'aspiration d'azote liquide est arrêtée quand la vanne est ouverte. Ce dispositif permet de réguler la température à $\pm$ 1°C.

Nous avons signalé plus haut que le repérage de la température s'obtient par l'intermédiaire du thermocouple Th dont la soudure prend appui au centre de la fenêtre. Des essais ont été effectués en plaçant une soudure de thermocouple entre les fenêtres, là où se trouve effectivement l'échantillon. Les températures indiquées par les deux thermocouples sont voisines et de l'ordre de — 125°C. En outre, le dispositif décrit ci-dessus permet d'orienter l'échantillon par rapport au faisceau incident, grâce à la résistance chauffante placée sur la tête du porte-échantillon (photo 3 et 4), qui empêche les joints de geler.

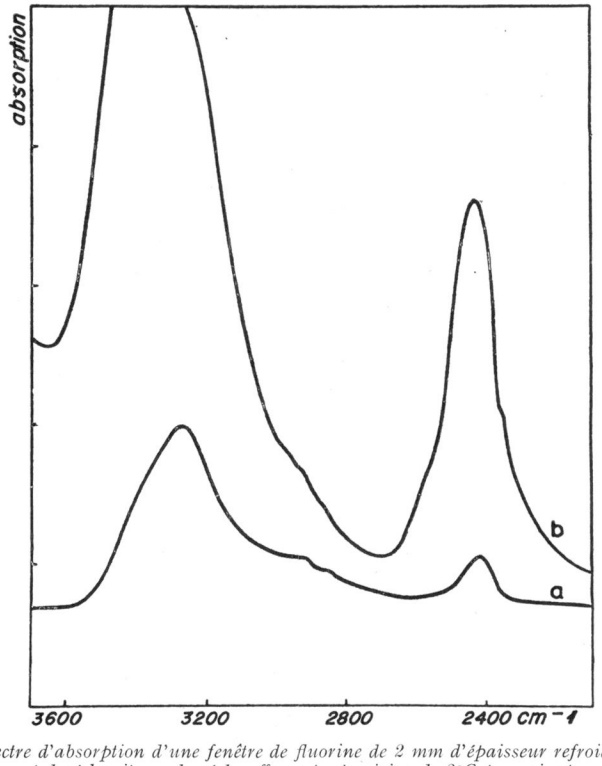


FIG. 7. — *Spectre d'absorption d'une fenêtre de fluorine de 2 mm d'épaisseur refroidie à — 125°C et dont la vitesse de réchauffement est voisine de 2°C par minute*

a : à une température voisine de — 60°C
b : à une température voisine de — 50°C
Le maximum d'absorption semble se produire vers — 40°C

D'un point de vue pratique, il est absolument indispensable de ne faire les enregistrements que dans la mesure où la température de l'échantillon est bien stabilisée. En effet, nous avons observé sur des systèmes non stabilisés, lorsque le porte-

échantillon est équipé de fenêtres en CaF_2, une augmentation considérable de la densité optique à 2 430 et 3 260 cm^{-1}, due à la fluorine. La figure 7 représente les spectres obtenus au cours d'un réchauffement rapide (de l'ordre de 2°C par minute) avec une fenêtre de fluorine seule, de 2 mm d'épaisseur. Le maximum d'aborption se produit pour une température voisine de — 40°C.

Ann. agron., 1975, **26** (5), 537-554.

ESTIMATION DE L'ETR RÉGIONALE A PARTIR DE L'ETP LOCALE : UTILISATION DE LA RELATION DE BOUCHET A DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS

J. P. FORTIN et B. SEGUIN *

I. N. R. S.-Eau, C. P. 7500,
Sainte-Foy, Québec (Canada)

* *Station de Bioclimatologie,*
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Différentes études expérimentales ont montré que la relation établie par BOUCHET entre ETR et ETP était en bon accord avec les résultats obtenus et pouvait même être valablement utilisée par déterminer l'ETR régionale, du moins pour les échelles de temps considérées par BOUCHET, c'est-à-dire supérieures à l'échelle mensuelle. La possibilité de disposer de données simultanées d'ETR et d'ETP suffisamment précises pour déterminer les valeurs journalières nous a amenés à effectuer une étude comparable, mais portant sur des pas de temps plus courts, compris entre 1 et 30 jours.

Une analyse théorique préalable s'est avérée nécessaire pour déterminer les corrections qui doivent être éventuellement apportées à la relation de BOUCHET à cette échelle de temps. Cette analyse a permis de retrouver, par une voie différente, la relation

$$ETR + ETP = (1 - a)\ Rg + Q$$

en se basant sur l'ordre de grandeur des valeurs moyennes des termes radiatif et advectif contribuant à l'évapotranspiration sur une longue période. La signification du terme Q, correspondant à l'advection à l'échelle régionale, a pu être explicitée. Lorsque l'échelle de temps est plus réduite, les écarts par rapport à ces valeurs moyennes font apparaître des termes correctifs, dont l'expression est analysée et discutée.

Les résultats expérimentaux confirment la validité de la relation théorique en dépit d'une dispersion qui augmente à mesure que le pas de temps diminue. C'est ainsi que, dans 75 p. 100 des cas, la quantité ETR + ETP peut être estimée à partir de $(1 - a)$ Rg, sans entraîner d'erreur supérieure à 1 mm/jour, même pour des pas de temps très courts (9 jours). Les coefficients de corrélation obtenus entre ces deux grandeurs sont généralement supérieurs à 0,8. L'analyse des valeurs mensuelles fait apparaître une déviation continue, vraisemblablement liée à l'évolution saisonnière de la température de l'air. L'étude statistique des écarts entre ETR + ETP et $(1 - a)$ Rg montre une bonne corrélation de cette variable avec la température de l'air d'une part, l'humidité relative d'autre part, à condition d'introduire des seuils respectifs pour chacune de ces

données. Ces seuils, qui peuvent être préalablement déterminés, correspondent aux valeurs moyennes précédemment définies dans l'analyse théorique. Une extension de la méthode à des pas de temps relativement courts peut donc être envisagée, à condition de disposer de mesures complémentaires.

I. — INTRODUCTION

L'évapotranspiration potentielle ETP correspond à la « demande » exercée par le climat sur une surface bien alimentée en eau. Son estimation peut donc être effectuée à partir des données climatiques avec une précision satisfaisante. Il n'en est pas de même pour l'évapotranspiration réelle ETR, dans laquelle intervient la limitation des disponibilités en eau au niveau de la surface considérée. En particulier, l'évaluation de l'ETR à l'échelle régionale pose de nombreux problèmes.

Les méthodes qui permettent d'obtenir des estimations précises (méthode des fluctuations, méthode aérodynamique, méthode du bilan d'énergie) supposent l'utilisation d'un matériel complexe et, surtout, ne donnent que des indications ponctuelles. Il faudrait envisager l'installation d'un nombre trop important de points de mesure pour obtenir une représentativité spatiale satisfaisante. Il en est de même pour les mesures directes d'ETR à partir de lysimètres. Seule la méthode du bilan hydrologique semble devoir répondre à ces impératifs d'échelle spatiale. Mais les mesures sont relativement peu précises et elles nécessitent des périodes de temps relativement longues.

Une approche très différente, résultant des travaux de BOUCHET (1963), peut être envisagée. Elle consiste à utiliser l'influence sur l'ETP mesurée à l'échelle locale pour en déduire les variations d'ETR régionale. Un certain nombre d'études expérimentales ont montré que cette méthode pouvait donner des résultats valables à des échelles de temps relativement longues. Il a donc semblé intéressant d'étudier les possibilités éventuelles d'application à des pas de temps plus courts.

II. — RÉSULTATS DES ÉTUDES EXPÉRIMENTALES ANTÉRIEURES

Si ETR représente l'évapotranspiration réelle d'une surface suffisamment étendue pour représenter l'échelle régionale (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares), ETP la mesure locale de l'évapotranspiration potentielle au centre de cette surface et ETP_0 la valeur qui serait prise conjointement par ces deux grandeurs si l'alimentation en eau n'était pas limitée, BOUCHET (1963, 1964) a établi les relations suivantes

$$ETR + ETP = 2\,ETP_0 \qquad (1)$$

$$2\,ETP_0 \leqslant (1 - a)\,Rg + Q \qquad (2)$$

où $(1 - a)\,Rg$ représente l'énergie solaire absorbée par la surface et Q l'ensemble des échanges d'énergie latéraux de grande échelle qui correspond à ce qu'on peut appeler l'advection à l'échelle régionale.

Ainsi que le souligne BOUCHET, ces relations ne sont qu'approximatives et doivent être considérées plutôt comme des inéquations, qui ne se rapprochent d'égalités strictes que lorsque les échelles d'espace et de temps considérées sont suffisamment grandes. C'est pourquoi les études expérimentales antérieures ont porté sur des périodes relativement longues.

A l'échelle annuelle, BOUCHET (1963), utilisant les données de la zone équatoriale (où ETR = ETP = ETP_0), a montré que l'approximation de ETP_0 par la quantité 0,5 (1 — *a*) Rg était valable. En effet, les valeurs des ETR observées sont comprises entre 1 030 et 1 245 mm, alors que le deuxième terme varie entre 990 et 1 340 mm. Par ailleurs, les données recueillies par SOLOMON (1967) mettent en évidence une variation simultanée d'ETR et d'ETP qui est en bon accord avec la théorie. De même, RIOU (1972 *b*) a pu analyser la variation d'ETR et d'ETP annuelles en fonction de la latitude. En zone aride, vers 13° N, l'ETP annuelle est de l'ordre de 2 000 mm/an, alors que l'ETR ne dépasse pas 300 mm. A mesure qu'on se rapproche de l'équateur et que le climat devient humide, l'ETP diminue et l'ETR augmente, jusqu'à devenir identiques (de l'ordre de 1 200 mm/an) vers 4° N de latitude.

A l'échelle mensuelle, MORTON (1965, 1969, 1970) montre que, de façon approximative, ETP varie entre les limites (1 — *a*) Rg en climat sec et 0,5 (1 — *a*) Rg en climat humide. Par ailleurs, RIOU (1972 *a*) constate qu'en zone équatoriale où ETR est toujours voisine d'ETP, la comparaison entre les valeurs mensuelles d'ETP et de Rg permet d'établir la liaison ETP = 0,45 Rg avec un coefficient de corrélation de 0,99. De plus, le rapport $\frac{\text{ETP}}{\text{Rg}}$ en 1968 est passé de 0,69 en avril à 0,45 en juillet, et a donc diminué à mesure que la saison des pluies progressait. Cette série d'observations semble donc prouver qu'en première approximation, les relations de BOUCHET peuvent être considérées comme valables, au moins pour des échelles de temps supérieures à l'échelle mensuelle. MORTON estime que leur utilisation doit permettre de calculer l'ETR moyenne d'un bassin, à cette échelle de temps, avec probablement autant sinon plus de précision que la méthode du bilan hydrologique.

III. — DISCUSSION DES RELATIONS DE BOUCHET ET DE LEUR VALIDITÉ A DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'ESPACE ET DE TEMPS

L'accord observé entre la théorie de BOUCHET et les résultats expérimentaux semble donc satisfaisant au premier abord, et peut-être même supérieur à celui que l'on pouvait attendre, dans la mesure où BOUCHET lui-même formule des réserves sur la précision des relations qu'il a établies, compte tenu des approximations introduites. Avant d'étudier leur validité sur des périodes de temps plus courtes, il semble donc nécessaire de les discuter de façon plus détaillée et, en particulier, de prévoir leur modification éventuelle en fonction des échelles d'espace et de temps.

Leur représentation spatiale a fait l'objet d'une étude récente (SEGUIN, 1975). La relation (1) apparaît comme un cas particulier d'une relation plus générale, où

interviennent les dimensions respectives x et L, des surfaces (s) et (S) correspondant respectivement à la définition d'ETP et d'ETR

$$\text{ETR} + \text{ETP} = 2\,\text{ETP}_0 + \left(f\left[\frac{x}{L}\right]\right)(\text{ETP}_0 - \text{ETR}) \tag{3}$$

Les calculs montrent que le terme correctif $\left(f\left[\frac{x}{L}\right]\right)(\text{ETP}_0 - \text{ETR})$ est faible lorsque x varie entre 10 et 100 m pour des valeurs de L, caractéristiques de l'échelle régionale. Ce sont les dimensions des anneaux de garde généralement respectés dans les études expérimentales, ce qui permet d'expliquer la validité approchée de la relation (1).

Il est également possible de retrouver la relation (2) et d'en établir une expression plus complète en évaluant la quantité ETP_0, alors que BOUCHET utilise directement l'évaluation de $2\,\text{ETP}_0$. Par définition, ETP_0 représente l'évaporation d'une vaste surface maintenue humide et peut donc être évaluée à partir de la formule de Penman

$$\text{ETP}_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}\,\text{Rn}_0 + \text{Ea}_0}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \tag{4}$$

ETP_0 résulte de la contribution d'un terme radiatif $\frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}}\,\text{Rn}_0$ et d'un terme advectif $\frac{\text{Ea}_0}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}}$. Désignons respectivement par R_0 et Q_0 ces deux termes. Leurs ordres de grandeur relatifs ont une variabilité d'autant plus grande que l'échelle de temps considérée est plus courte. Elle tend à se stabiliser et à devenir une caractéristique du climat régional lorsque cette échelle est suffisamment longue (de l'ordre du mois). Soient $\overline{\text{R}_0}$ et $\overline{\text{Q}_0}$ les valeurs moyennes correspondant à cette condition. Le terme $\overline{\text{Q}_0}$ est faible, de manière générale, par rapport au terme $\overline{\text{R}_0}$, en dehors des zones soumises à des systèmes notables d'advection à grande échelle (régions côtières (NIXON et LAWLESS, 1968) ou voisines de vastes étendues d'eau ; régions bordées de vastes surfaces sèches ; régions sujettes à des vents violents et fréquents). Il est important de préciser la nature de l'énergie advective qui est considérée pour la définition du terme Q : elle résulte des échanges latéraux d'énergie entre la surface (S) et le système environnant. Elle correspond donc à une échelle d'espace supérieure ou égale à celle de (S) et dépend de l'évolution des caractéristiques des masses d'air passant sur cette surface. Par contre, elle ne fait aucunement intervenir les systèmes d'advection locale liés aux variations d'ETR, qui correspondent à une échelle d'espace plus réduite (entre s et S) et interviennent uniquement au niveau de la relation (1) entre ETR et ETP. Ces systèmes d'advection locale sont nuls, par définition, lorsque $\text{ETR} = \text{ETP}_0$.

Lorsque l'advection à grande échelle est faible, les ordres de grandeur de $\overline{\text{R}_0}$ et $\overline{\text{Q}_0}$ peuvent être estimés d'après PENMAN (1956). Pour le Nord-Ouest de l'Europe, qui est une zone relativement humide, le rapport $\frac{\Delta}{\gamma}$ est voisin de 2, et Rn_0 prend des

valeurs qui sont le double ou le triple de celles de Eao. (Ces estimations ne sont évidemment valables que pour les périodes actives de végétation, qui sont celles correspondant aux valeurs significatives d'ETP_0). Le rapport moyen $\frac{\overline{Q_0}}{\overline{R_0}}$ est donc de l'ordre de 0,20 à 0,40. Par suite, le terme advectif n'intervient que pour 20 à 30 p. 100 dans ETP_0 et peut être considéré comme un simple facteur multiplicateur du terme radiatif. Ceci est conforme à l'avis de PRIESTLEY et TAYLOR (1972), qui estiment que l'énergie advective de grande échelle est, en général, d'une importance secondaire par rapport à l'énergie d'origine solaire. En regroupant diverses observations, ces auteurs proposent d'ailleurs la relation moyenne $ETP_0 = 1{,}26\ \overline{R_0}$.

Quant au terme radiatif $\overline{R_0}$, compte tenu de la forte corrélation généralemeut observée entre le rayonnement net Rn_0 et le rayonnement global Rg, il peut être estimé à partir de l'énergie solaire absorbée $(1 - a)$ Rg. En effet,

— d'une part, le rayonnement net infrarouge peut s'évaluer à partir de la formule de Brunt

$$R_{IR} = \sigma T_a^4 (\alpha - \beta \sqrt{e_a}) \left(c + d \frac{n}{N}\right) \tag{5}$$

T_a et e_a étant la température et la tension de vapeur d'eau de l'air, $\frac{n}{N}$ la fraction d'insolation α, β, c et d des constantes dépendant de la zone climatique considérée,

— d'autre part, Rg est relié à la quantité Rg_M, rayonnement global maximum au sol, qui dépend de la latitude et de la saison, par l'expression

$$Rg = Rg_M \left(c + d \frac{n}{N}\right) \tag{6}$$

Il en résulte que

$$R_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} R_{N_0}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} = A\ (1 - a)\ Rg \tag{7}$$

avec

$$A = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \left[1 - \frac{\sigma T_a^4 (\alpha - \beta \sqrt{e_a})}{(1 - a)\ Rg_M}\right] \tag{8}$$

Dans l'expression de A interviennent T_a, e_a et Rg. Dans les régions proches de l'équateur, ces paramètres sont relativement stables au cours de l'année, et A prend une valeur à peu près constante. A mesure que l'on s'éloigne de l'équateur apparaît une variation saisonnière qui doit se traduire par une évolution continue du terme A. Ceci est confirmé par l'étude de BROCHET et GERBIER (1972), qui ont soumis les valeurs fournies par l'ensemble du réseau météorologique français à une analyse statistique. Ces auteurs ont constaté une très faible variabilité interannuelle de la quantité A (dans 95 p. 100 des cas, pour le territoire français, le rapport de l'écart-type à la moyenne est voisin de 0,05). Par contre, sa valeur moyenne varie de façon continue au cours de la saison de végétation, en passant d'environ 0,30 au printemps et à l'automne à environ 0,45 en été. On peut d'ailleurs supposer que cette valeur maximale

est voisine de la valeur constante caractéristique des zones équatoriales (que l'on peut estimer de l'ordre de 0,5 à 0,6 à partir des données de RIOU (1972 *a*)). Compte tenu de l'ordre de grandeur précédemment discuté du terme advectif, il en résulte l'estimation suivante (à environ 20 p. 100 près)

$$\overline{ETP_0} = 0{,}5\ (1 - a)\ Rg \tag{9}$$

On retrouve donc la relation (2) avec les mêmes restrictions : cette relation n'est valable qu'en moyenne, pour des périodes suffisamment longues et en dehors des systèmes importants d'advection à grande échelle.

Si la surface (S) est soumise à des influences advectives importantes et constantes, le terme Q correspondant peut être significativement différent de $\overline{Q_0}$. Il en résulte un apport (ou une perte) d'énergie supplémentaire $\overline{Q} - \overline{Q_0}$ d'où

$$\overline{ETP_0} = 0{,}5\ (1 - a)\ Rg + (\overline{Q} - \overline{Q_0}) \tag{10}$$

Cette relation permet d'expliciter la signification du terme Q_{1-5} introduit par BOUCHET (1963), qui représente, en fait, $2\ (\overline{Q} - \overline{Q_0})$.

Lorsque l'échelle de temps devient inférieure à celle considérée pour la définition des valeurs moyennes $\overline{R_0}$ et $\overline{Q_0}$, la relation (2) n'est plus valable. Il est alors nécessaire de prendre en compte la variabilité de ces paramètres. La relation devient

$$ETR + ETP = (1 - a)\ Rg + dR + dQ \tag{11}$$

les termes dR et dQ correspondant aux écarts des termes radiatif et advectif par rapport à leurs valeurs moyennes.

A l'échelle mensuelle, et même à l'échelle décadaire, l'influence de dQ doit être faible. Il en est de même, dans les zones proches de l'équateur, pour dR, en raison de la relative constance des paramètres climatiques déjà citée, ce qui explique le bon accord observé dans les études expérimentales effectuées dans ces régions. Par contre, en zone tempérée, l'évolution saisonnière doit se traduire par une dérive relativement régulière, conduisant à $ETR + ETP < (1 - a)\ Rg$ pour les périodes de réchauffement, et $ETR + ETP > (1 - a)\ Rg$ pour les périodes de refroidissement.

A un pas de temps encore plus court doit également apparaître l'influence éventuelle de dQ, lors du passage de masses d'air dont les propriétés sont très différentes de celles préexistantes. En dehors de la vitesse du vent, dQ dépend des variations de température et d'humidité de l'air, qui interviennent également sur le terme dR. Il sera difficile de déterminer séparément les influences de ces deux termes.

Ces considérations théoriques préalables permettent de mieux comprendre l'évolution de la relation (2) lorsque l'analyse porte sur des pas de temps relativement courts, ce qui est le cas de l'étude expérimentale suivante.

IV. — PRÉSENTATION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET DES MESURES D'ÉVAPOTRANSPIRATION

Les données utilisées dans cette étude expérimentale sont celles du domaine de la Minière, dépendant de la station de Bioclimatologie de Versailles (I. N. R. A.) dont elle est distante d'environ 10 km à vol d'oiseau (49° N). La figure 1 indique la situation de chacun des appareils de mesures sur le terrain, et leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 1. Une

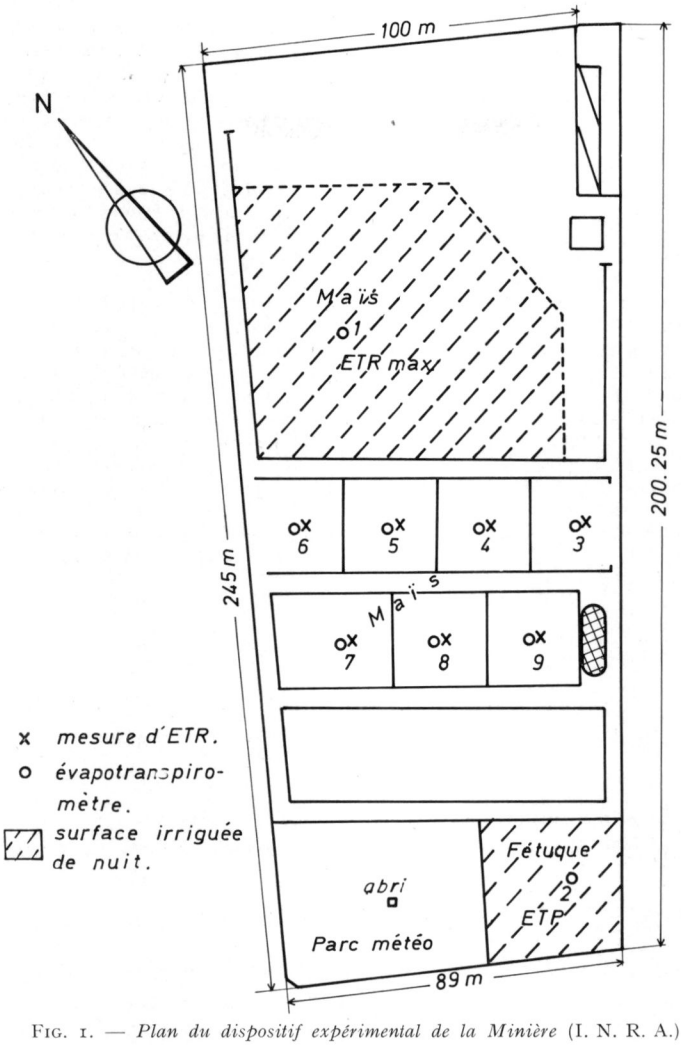


FIG. 1. — *Plan du dispositif expérimental de la Minière* (I. N. R. A.)

TABLEAU I

Caractéristiques principales des évapotranspiromètres de la Minière

N° de l'évapo-transpiromètre	Système de mesure	Type de mesure	Surface (en m²)	Profondeur (en m)
1	Bascule + Pesons	ETR_{max} culture	3,45	2,00
2	Pesons	ETP (ETR_{max} fétuque)	4,70	0,60
3 à 9	Pesons	ETR culture	3,45	2,00

description plus détaillée de leur principe de mesure peut être trouvée dans l'article de ARCHER, GREBET et SAMIE (1970). Sauf l'appareil nº 2, dont la surface est constamment recouverte de gazon pour servir de référence à la mesure d'ETP, les évapotranspiromètres ont une couverture variable avec la saison. Leur surface demeure nue de l'automne au printemps, ils sont ensuite recouverts de végétation de mai à octobre-novembre. Depuis 1969, les mesures sont effectuées sur du maïs.

L'ensemble de ce dispositif expérimental a permis d'obtenir des données d'évapotranspiration suffisamment précises pour permettre leur exploitation à partir de valeurs journalières. La sensibilité des appareils de mesures d'ETR est 3 à 4 fois moindre que celle de l'évapotranspiromètre utilisé pour la détermination d'ETP (celle-ci étant de l'ordre de 0,15 mm), mais cet écart qualitatif est compensé par le fait que l'ETR journalière résulte de la moyenne des valeurs fournies par 5 appareils (l'écart moyen journalier entre la valeur la plus élevée et la plus faible est de l'ordre de 0,6 mm pour les mois de juillet et d'août). Quant au terme $(1 - a)$ Rg, il est connu à environ 5 à 10 p. 100 près.

Une discussion de la représentativité des mesures d'ETR et d'ETP s'impose avant la présentation des résultats. D'après sa définition, ETP devrait être mesurée sur une surface ayant même rugosité et même albédo que la surface régionale. Ce n'est pas le cas, la mesure d'ETP étant effectuée de manière classique sur une surface de gazon. L'ETP obtenue ne sera donc pas tout à fait représentative. Par contre, l'anneau de garde qui entoure l'évapotranspiromètre possède des dimensions suffisantes (environ 30 m × 30 m) pour répondre aux exigences précédemment citées quant à la validité de la relation (1). Quant à l'ETR considérée dans la théorie, sa définition est celle de l'ETR régionale moyenne. Les valeurs mesurées, qui sont des données ponctuelles, n'en seraient réellement représentatives que si le domaine expérimental de la Minière était entouré de cultures de maïs suffisamment étendues, ce qui n'est pas le cas. Il semble que l'ETR du maïs soit légèrement plus élevée que celles des autres cultures caractéristiques de la région. Il se pourrait donc que les valeurs obtenues surestiment légèrement l'ETR régionale moyenne, mais cette hypothèse est difficilement vérifiable.

V. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA THÉORIE DE BOUCHET A DES PAS DE TEMPS INFÉRIEURS AU MOIS

De manière à déterminer l'évolution de la relation entre ETR + ETP et $(1 - a)$ Rg à mesure que le pas de temps diminue, les calculs ont été faits successivement sur des périodes de 30, 9, 3 et 1 jours. L'ensemble des résultats obtenus est présenté en détail dans le travail de FORTIN (1973). Nous ne présentons ici que les principales conclusions.

Les relations entre ETR + ETP et $(1 - a)$ Rg obtenues pour les années 1969, 1971 et 1972 sont présentées, pour les différents pas de temps choisis, dans les figures 2 *a*, 2 *b*, 2 *c* et 2 *d* ; (l'année 1970 n'a pu être utilisée à cause de pannes du système de mesure). Seuls les mois de juin à septembre sont pris en compte de façon à disposer de valeurs d'évapotranspiration significatives. L'étude des graphiques montre qu'en première approximation, la relation de BOUCHET semble confirmée par l'expérience, même pour les pas de temps plus courts que ceux considérés par les auteurs précédents. C'est ainsi qu'à l'échelle de 9 jours, dans 75 p. 100 des cas, l'estimation de la quantité ETR + ETP pourrait être faite directement à partir de $(1 - a)$ Rg sans entraîner une erreur sur la valeur moyenne journalière supérieure à 1 mm/jour. Il est possible d'observer une variation d'une année à l'autre (les points correspondant à l'année 1969 se situent généralement au-dessus de la droite ETR + ETP = $(1 - a)$ Rg, ceux de l'année 1971 de part et d'autre et ceux de 1972 plutôt au-dessous). Cette évolution pourrait résulter d'une dérive dans le temps de certains appareils de mesure (ARCHER, GREBET et SAMIE, 1970), mais une explication purement climatologique pourrait également être proposée, ainsi que nous le verrons par la suite.

La dispersion augmente notablement lorsque le pas de temps diminue de 9 à 3 jours, puis 1 jour. Ce qui apparaît logique, compte tenu des réflexions du paragraphe précédent, et également de l'importance relative plus grande des erreurs de mesure à cette échelle de temps.

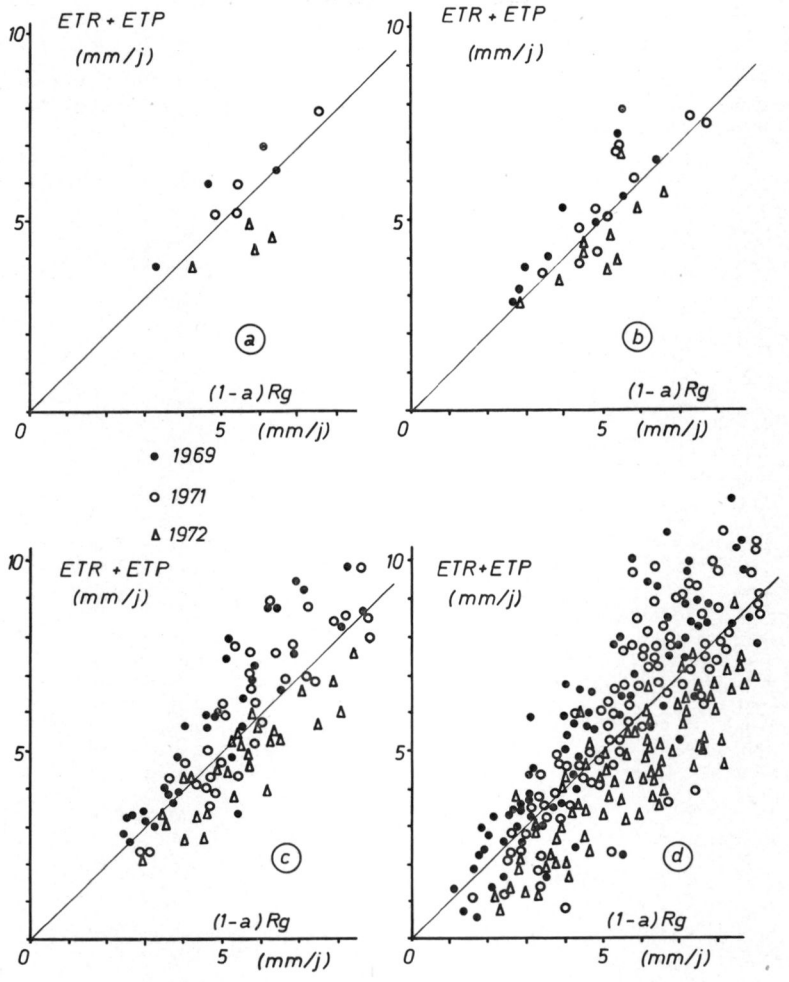


FIG. 2. — *Relations entre* ETR + ETP *et* (1 — *a*) Rg (exprimés en mm/jour)
(*a*) valeurs moyennes sur 30 jours
(*b*) valeurs moyennes sur 9 jours
(*c*) valeurs moyennes sur 3 jours
(*d*) valeurs moyennes sur 1 jour

L'analyse des corrélations simples présentées dans le tableau 2 confirme et précise ces observations qualitatives... Les corrélations (1), (2) et (10), correspondant respectivement à des pas de temps de 9, 3 et 1 jours, permettent, en effet, d'obtenir des pentes qui ne sont pas significativement différentes de 1 (si l'on considère un intervalle de confiance de 95 p. 100) avec des ordonnées à l'origine proches de zéro. Dans les trois cas, le pourcentage de variance expliquée se maintient légèrement en dessous

de 70 p. 100. En considérant que les erreurs de mesure précédemment discutées peuvent introduire au moins 10 à 15 p. 100 de la variance totale, il resterait à en expliquer seulement environ 15 p. 100 à partir des termes dR et dQ.

TABLEAU 2

Corrélations simples entre (ETR + ETP) *et* (1 — *a*) Rg

Dans ce tableau, x correspond à (1 — a) Rg, y à ETR + ETP, N au nombre de couples de valeurs, r, a_0 et a_1 correspondent respectivement au coefficient de corrélation, à l'ordonnée à l'origine et à la pente de droite de régression.

N°	Description	Pas (j)	N	$\bar{x}$ (mm/j)	σx (mm/j)	$\bar{y}$ (mm/j)	σy (mm/j)	r	a_0 (mm/j)	a_1
1	Années 1969-71-72	9	32	5,39	1,34	5,55	1,63	0,80	0,29	0,98
2	— 1969-71-72	3	103	5,39	1,59	5,55	1,97	0,83	0,04	1,02
3	— 1969	3	35	4,97	1,69	5,76	2,20	0,88	0,05	1,15
4	— 1971	3	36	5,81	1,50	6,17	1,91	0,87	— 0,28	1,11
5	— 1972	3	32	5,37	1,45	4,63	1,35	0,88	0,22	0,82
6	Juin 1969-71-72	3	23	5,77	1,11	5,30	1,47	0,80	— 0,79	1,06
7	Juil. 1969-71-72	3	26	6,69	1,53	6,90	1,96	0,79	0,13	1,01
8	Août 1969-71-72	3	26	5,17	1,23	5,78	1,84	0,75	— 0,06	1,13
9	Sept. 1969-71-72	3	28	4,09	1,15	4,29	1,56	0,86	— 0,44	1,16
10	Années 1969-71-72	1	319	5,39	1,93	5,54	2,46	0,83	— 0,14	1,05
11	Année 1969	1	109	4,97	2,03	5,75	2,67	0,86	0,12	1,14
12	Année 1971	1	111	5,8	1,79	6,15	2,43	0,85	— 0,55	1,15
13	Année 1972	1	99	5,37	1,89	4,62	1,93	0,89	— 0,28	0,91
14	Juin 1969-71-72	1	72	5,77	1,71	5,32	2,25	0,83	— 0,95	1,09
15	Juil. 1969-71-72	1	81	6,63	1,96	6,90	2,54	0,80	— 0,05	1,05
16	Août 1969-71-72	1	80	5,22	1,62	5,72	2,37	0,78	— 0,24	1,14
17	Sept. 1969-71-72	1	86	4,08	1,44	4,27	1,84	0,83	— 0,04	1,06
18	Juin 1969	1	22	6,33	1,87	6,45	2,31	0,88	— 0,44	1,09
19	Juil. 1969	1	29	6,00	1,92	7,02	2,91	0,79	— 0,21	1,20
20	Août 1969	1	28	4,57	1,49	5,97	2,44	0,93	— 0,94	1,52
21	Sept. 1969	1	30	3,35	1,25	3,83	1,57	0,88	0,12	1,11
22	Juin 1971	1	20	5,38	1,46	5,25	2,15	0,84	— 1,43	1,24
23	Juil. 1971	1	28	7,64	1,48	7,90	2,09	0,86	— 1,35	1,21
24	Août 1971	1	25	5,39	1,38	6,26	2,37	0,84	— 1,46	1,43
25	Sept. 1971	1	28	4,81	1,33	5,26	2,08	0,79	— 0,67	1,23
26	Juin 1972	1	20	5,76	1,74	4,20	1,66	0,92	— 0,85	0,88
27	Juil. 1972	1	24	6,21	2,02	5,58	1,97	0,86	0,34	0,84
28	Août 1972	1	27	5,63	1,69	4,96	2,07	0,95	— 1,56	1,16
29	Sept. 1972	1	28	4,13	1,37	3,77	1,42	0,88	— 0,03	0,92

Afin d'étudier plus en détail l'évolution de la relation à ces pas de temps courts, il importe d'examiner des échantillons plus restreints. L'étude du tableau 2 fait apparaître une corrélation plus élevée entre valeurs provenant des mois d'une même année qu'entre les valeurs d'un même mois d'années différentes. Calculées à partir des valeurs journalières, les corrélations (11) à (17) conduisent aux mêmes conclusions. Ces constatations confirment l'observation qualitative d'une dérive des résultats des années 1969 à 1971 et 1972. Si l'hypothèse d'une dérive mécanique des appareils de mesure n'est pas à rejeter, elle n'est pas la seule à envisager. En effet, l'étude du tableau 3, indiquant les principales caractéristiques thermiques des années considé-

rées, fait apparaître une dérive climatologique qui coïncide avec la dérive des résultats : l'année 1972 est caractérisée par des températures notablement moins élevées qu'en 1971 et surtout 1969. Il pourrait donc s'agir là en partie, de l'influence, au deuxième ordre, de la température de l'air sur le terme $\frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1+\frac{\Delta}{\gamma}}$. Cette hypothèse semble être confirmée par les données portant sur des périodes de temps plus réduites.

TABLEAU 3

Moyennes thermiques des mois d'été pour les années 1969-1971-1972 au domaine de la Minière

	Juin			Juillet			Août			Septembre		
	1969	1971	1972	1969	1971	1972	1969	1971	1972	1969	1971	1972
T_m	10,1	10,0	8,3	13,3	13,3	12,8	12,5	12,7	11,7	11,4	9,5	8,7
T_M	19,6	18,3	17,6	24,0	24,3	22,2	22,5	22,6	21,1	20,3	22,6	16,9
$\overline{T}$	14,9	14,1	12,9	18,6	18,8	17,5	17,5	17,6	16,4	15,9	15,1	12,8

Ainsi, si les données sont analysées mois par mois (corrélations (18) à (29)), il apparaît une variation régulière de la pente, qui n'est cependant pas significative, sauf pour le mois d'août, pour lequel la pente est nettement plus élevée. Si cette variation cyclique correspond à la variation saisonnière de la température de l'air, il apparaît cependant un déphasage avec celle-ci, puisque le maximum thermique se situe en juillet, et non en août. Elle pourrait alors résulter de l'effet combiné de la variation de $\frac{\Delta}{1+\gamma}$ d'une part et de l'évolution de dQ d'autre part (à partir du maximum de juillet, le refroidissement du système entraînerait un gain d'énergie par advection).

Les coefficients de corrélation élevés obtenus pour certains mois (0,93 pour août 1969, 0,92 pour juin 1972, 0,95 pour août 1972) rappellent que, pour un mois donné, les points se groupent, de façon surprenante à première vue, remarquablement bien autour de la droite de régression, même en considérant les valeurs journalières, puisque les coefficients sont rarement inférieurs à 0,8.

VI. — ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES ÉCARTS ETR + ETP — (1 — *a*) Rg ET LES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES

D'après l'analyse du paragraphe 3, les écarts ETR + ETP — (1 — *a*) Rg devraient résulter des écarts cumulés des termes radiatif et advectif par rapport à leur valeur moyenne. Leur influence respective est difficile à délimiter, et il semble

nécessaire de les considérer globalement. Dans ces conditions, deux facteurs climatiques interviennent, aussi bien sur le terme radiatif que sur le terme advectif : ce sont la température et l'humidité de l'air. Il est donc logique de tenter de mettre en relation les écarts observés avec ces deux facteurs. Afin d'obtenir une variation plus significative, nous n'avons pas considéré la valeur moyenne de ceux-ci, mais leurs extrêmes, correspondant à la température maximale T_M et l'humidité minimale H_{rm}. Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 4. Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés, mais laissent entrevoir, compte tenu des erreurs de mesure, la possibilité d'une relation effective. Par ailleurs, le regroupement des droites de régression obtenues fait apparaître l'existence de points d'écart nul pour T_M et H_{rm} (fig. 3).

TABLEAU 4

Corrélations entre (ETR + ETP) — (1 — *a*) Rg *et* T_M *et* H_{rm}

r, a_0 et a_1 correspondent respectivement au coefficient de corrélation, à l'ordonnée à l'origine et à la pente de la droite de régression

Mois	T_M (°C)			H_{rm} (%)		
	r	a_0 (mm/j)	a_1	*r*	a_0 (mm/j)	a_1
Juin 69-71-72	0,30**	— 2,52	0,11	— 0,20	0,38	— 0,02
Juil. 69-71-72	0,60**	— 5,67	0,25	— 0,22*	1,43	— 0,23
Août 69-71-72	0,56**	— 4,80	0,24	— 0,47**	2,78	— 0,05
Sept. 69-71-72	0,47**	— 2,54	0,14	— 0,22*	0,99	— 0,12

* Significatif au seuil de 5 p. 100.
** Significatif au seuil de 1 p. 100.

La détermination de ces valeurs singulières, mois par mois, semble mettre en évidence une variation saisonnière (23° en juin et juillet, 20° en août, 18° en septembre) qui est cependant insuffisante pour être significative, en raison de la faible précision obtenue pour cette détermination. Il est donc plus logique de ne considérer qu'une valeur moyenne, de l'ordre de 21°C. De même, la valeur moyenne d'humidité relative minimale se situe autour de 60 p. 100. Le tableau 5 récapitule les corrélations obtenues mois par mois, en tenant compte de ces constantes. Les coefficients peuvent s'élever jusqu'à 0,81 pour la température maximale et 0,78 pour l'humidité relative (août 1969). Cette observation est confirmée par les relations étroites qui apparaissent qualitativement, pour certaines périodes de mesure, dans les figures 4 et 5.

La signification de ces valeurs $\overline{T}_M$ et $\overline{H}_{rm}$ pourrait être mise en relation avec les discussions du paragraphe 3. Par définition, ces valeurs devraient être telles qu'en moyenne, les écarts ETR + ETP et (1 — *a*) Rg soient nuls. Elles correspondraient donc aux valeurs utilisées dans la définition des termes $\overline{R_0}$ et $\overline{Q_0}$, ce qui permettrait d'écrire

$$dR + dQ = B\,(T_M - \overline{T}_M) - C\,(H_{rm} - \overline{H}_{rm}) \qquad (12)$$

La prise en compte des influences respectives de dR et dQ nécessiterait des études complémentaires qui se poursuivent actuellement.

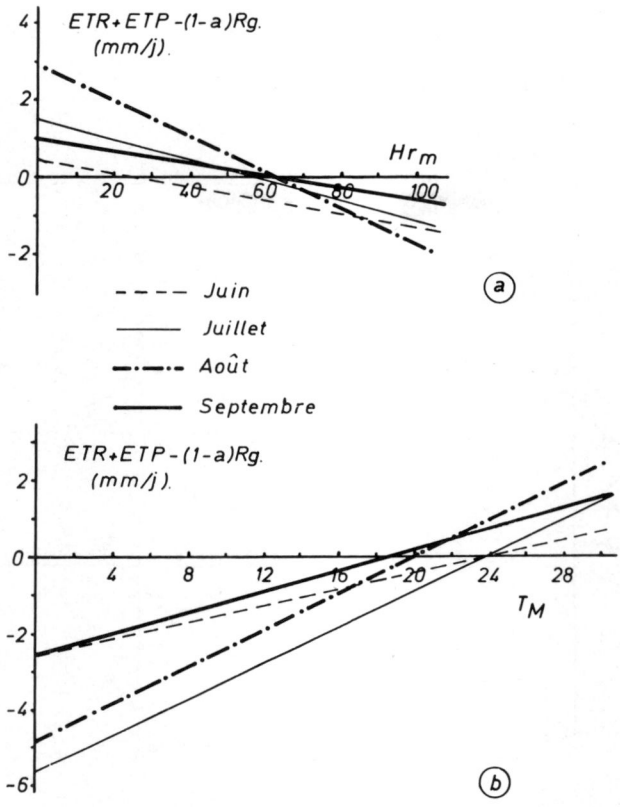


FIG. 3. — *Droites de régression entre l'écart* (ETR + ETP — (1 — *a*) Rg) *et*
(*a*) l'humidité relative minimale
(*b*) la température maximale

TABLEAU 5

Corrélations entre (ETR + ETP) — (1 — *a*) Rg *et* (T_M — 21) *et* (60 — H_{rm})
r, a_0 et a_1 correspondent respectivement au coefficient de corrélation, à l'ordonnée à l'origine et à la pente de la droite de régression

	(T_M — 21) (°C)			(60 — H_{rm}) (%)		
	r	a_0 (mm/j)	a_1	*r*	a_0 (mm/j)	a_1
Juin 1969	— 0,10	0,10	— 0,03	0,21	— 0,22	0,02
Juil. 1969	0,71	— 0,02	0,30	0,36	0,49	0,04
Août 1969	0,81	1,18	0,21	0,78	0,29	0,07
Sept. 1969	0,50	0,57	0,12	0,34	0,39	0,02
Juin 1971	0,60	0,57	0,25	0,43	— 0,22	0,05
Juil. 1971	0,63	— 0,63	0,25	0,46	— 0,70	0,06
Août 1971	0,43	0,46	0,26	0,74	0,09	0,10
Sept. 1971	0,52	0,56	0,25	0,49	— 0,21	0,05
Juin 1972	— 0,07	— 0,44	— 0,02	0,01	— 1,57	0,00
Juil. 1972	— 0,15	— 1,38	0,04	— 1,3	— 0,48	— 0,01
Août 1972	0,15	— 0,68	0,05	0,39	— 0,84	0,02
Sept. 1972	0,53	— 0,65	0,20	0,03	— 0,39	0,00

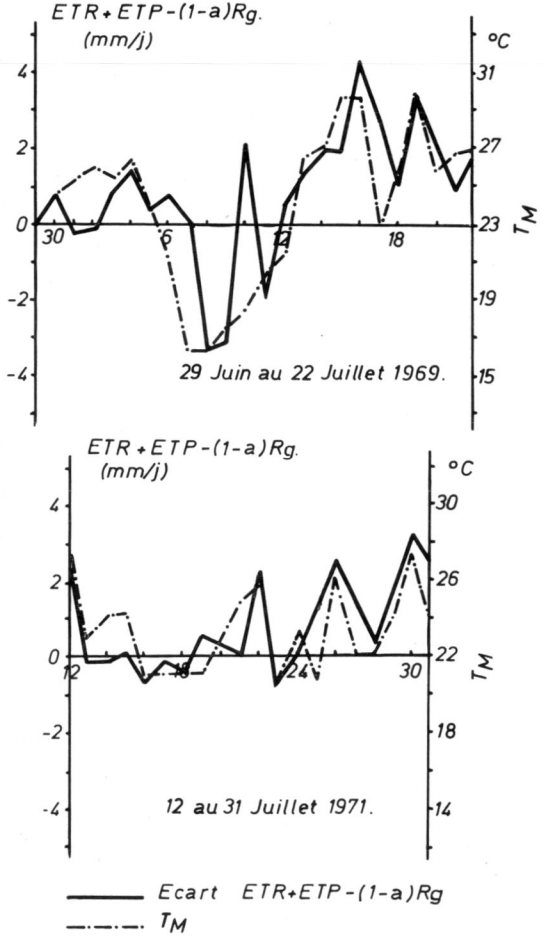


FIG. 4. — *Exemples de relations étroites entre l'écart* (ETR + ETP) — (1 — *a*) Rg *et la température maximale*

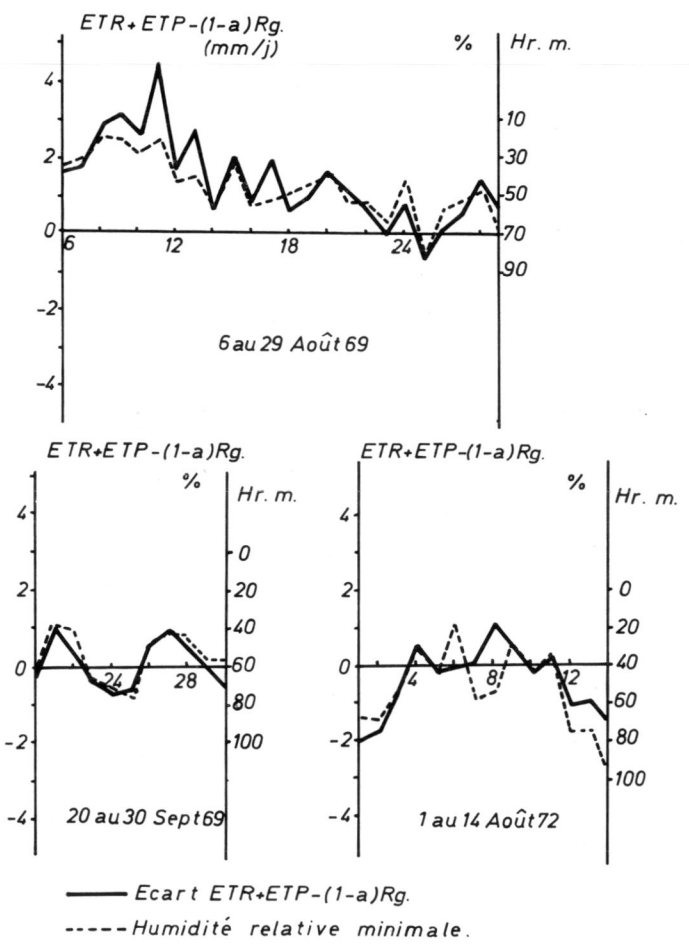


FIG. 5. — *Exemples de relations étroites entre l'écart* (ETR + ETP) — (1 — *a*) Rg *et l'humidité relative minimale*

CONCLUSION

Cette étude expérimentale confirme la validité de la relation de BOUCHET et la possibilité de l'utiliser pour déterminer l'ETR régionale, même à des pas de temps relativement courts. Son expression simplifiée, où la quantité ETR + ETP est estimée directement à partir du terme $(1 - a)$ Rg, semble être bien adaptée aux régions proches de l'équateur. Par contre, dans les zones tempérées, les variations climatiques saisonnières introduisent des écarts systématiques, essentiellement dûs à la variation du terme $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsqu'une précision accrue est recherchée dans des études portant sur ces régions.

Reçu pour publication en septembre 1975.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs plus vifs remerciements au personnel de la station Centrale de Bioclimatologie (I. N. R. A.), et plus particulièrement à M. ARCHER, qui leur ont communiqué les données d'évapotranspiration du domaine de la Minière, sur lesquelles est basée cette étude expérimentale.

SUMMARY

ESTIMATION OF REGIONAL EVAPORATION FROM LOCAL POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION : USE OF BOUCHET'S RELATION AT DIFFERENT TIME SCALES

Recent experimental studies have shown that the relation established by BOUCHET between ET and PET was in good agreement with obtained results, and could be used to determine regional evaporation, at less for large time periods (one month or more). The disponibility of simultaneous ET and PET data, precise enough to determine daily values, led us to undertake a similar study, but concerning shorter periods (between 1 and 30 days).

A previous theoretical analysis is necessary to determine eventual corrections for this time scale. This analysis allows to refind, by a different way, the relation ET + PET = $(1 - a)$ Rg + Q. It results from relative orders of magnitude of radiative and advective terms contributing to evaporation for a long period. The Q term, corresponding to regional advection, is clearly defined. When time scale is more reduced, the occurence of deviations relative to these mean values leads to use of corrective terms, whose expression is analysed and discussed.

Experiment results confirm the validity of BOUCHET's relation, in spite of an increasing dispersion when time period is reduced. As a practical test, for 75 p. 100 of cases, the quantity ET + PET may be directly estimated from the term $(1 - a)$ Rg without leading to an error larger than 1 mm/day, even for short periods. Correlation coefficients between these two variables are larger than 0,8. The analysis of monthly values displays a continuous variation, corresponding to the seasonal air temperature course.

Statistical analysis of deviations between ET + PET and $(1 - a)$ Rg shows a good correlation with either air temperature, either humidity, if thresold values, which may be previously determined, are in connection with mean values defined in the theoretical study. An extension of the method for short periods is then possible, if more complete micrometeorological measurements are available.

ZUSAMMENFASSUNG

BERECHNUNG DER TATSÄCHLICHEN DUNSTAUSSCHWITZUNG (TDA) EINER GEGEND VON DER ÖRTLICHEN POTENTIELLEN DUNSTAUSSCHWITZUNG (PDA) AUSGEHEND : ANWENDUNG VON BOUCHETS VERHÄLTNIS FÜR VERSCHIEDENE ZEITABSCHNITTE

In verschiedenen experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt dass Bouchets Verhältnis zwischen TDA und PDA in guter Übereinstimmung mit den erzielten Ergebnissen war und auch zur Bestimmung der TDA einer Gegend, wenigstens für die von Bouchet studierten Zeitabschnitte, die länger als ein Monat sind, gültig gebraucht sein konnte. Da wir über Werte von TDA und PDA, die für die Bestimmung von täglichen Werten genau genug waren, gleichzeitig verfügen könnten, waren wir dazugeführt, ein ähnliches Studium zu unternehmen, das aber kürzere Zeitabschnitte (von 1 bis 30 Tage) betraf.

Eine vorläufige theoretische Analyse war notwendig, um die Korrekturen zu bestimmen, die unter Umständen in Bouchets Verhältnis für diesen Zeitabschnitt eingeführt werden sollten. Diese Analyse hat es erlaubt, die Beziehung :

$$TDA + PDA = (1 - a)\ Rg + Q$$

anders wiederzufinden : beim Verwenden der Reihenfolge der Mittelwerte der Ausstrahlung und Advektion, die auf einen langen Zeitabschnitt zur Dunstausschwitzung beitragen. Die Bedeutung des Glieds Q (Advektion einer Gegend) konnte erklärt werden. Wenn der Zeitabschnitt kürzer ist, lassen die Abweichungen gegenüber den Mittelwerten Korrekturglieder erscheinen, deren Ausdrückung analysiert und erörtert wird.

Die experimentellen Ergebnisse bestätigen die Gültigkeit dieser theoretischen Beziehung trotz einer Zerstreuung, die zunimmt nachdem der Zeitabschnitt abnimmt. In 75 p. 100 der Fälle kann daher die Summe TDA + PDA von $(i - a)$ Rg berechnet werden, ohne selbst für sehr kürze Zeitabschnitte (9 Tage) Fehler höher als 1 mm/Tag hervorzubringen. Die Korrelations-koeffizienten zwischen diesen beiden Grössen sind meistens höher als 0,8. Die Analyse der monatlichen Werte lässt eine fortdauernde Abweichung erkennen, die wahrscheinlich mit der jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur verbunden ist. Die statistische Analyse der Abstände zwischen TDA + PDA und $(1 - a)$ Rg beweist eine gute Korrelation zwischen diesem Variabel und der Lufttemperatur einerseits und der relativen Feuchtigkeit anderseits unter der Bedingung dass für jede dieser grössen Schwellen festgestellt werden. Diese Schwellen, die vorher bestimmt werden können, entsprechen den vorher in der theoretischen Analyse definierten Mittelwerten. Eine Erweiterung der Methode zu kurzen Zeitabsshnitten kann betrachtet sein unter der Voraussetzung dass ergänzende Messungen zur Verfügung stehen.

РЕЗЮМЕ

Оценка реальной эвапотранспирации района, на базе местной потенциальной эвапотранспирации : применение формулы Буше к разным масштабам времени.

Ж. П. ФОРТЕН, Б. СЕГЕН.

В ходе разных экспериментальных изучений выяснилось что соотношение между ETR и ETP, найденное Буше, хорошо согласуется с полученными результатами и может применяться для определения ETR данного района, во всяком случае в масштабе отрезков времени рассматривавшихся Буше, то-есть превышавших месяц. В виду того, что у

нас была возможность располагать одновременно данными как об ETR, так и об ETP, достаточно точными для определения их ежедневных размеров, мы провели подобное изучение для отрезков времени более коротких, от 1-го до 30-ти дней.

Но, для определения возможных поправок, внесение которых в формулу Буше могло оказаться необходимым, для этого масштаба времени, возникла еще необходимость в предварительном теоритическом анализе. Этот анализ позволил прийти другим путем к формуле $ETR + ETP = (1 - a)\,Rg + Q$, обоснованную на средних величинах радиационных и адвекционных терминов длительного периода эвапотранспирации. Нам удалось об'яснить значение термина Q соответствующего адвекции в масштабе района. В случаях более ограниченных масштабов времени, различия с этими средними величинами, дают величины необходимых поправок. Выражения эти затем анализируются и обсуждаются.

Экспериментальные результаты подтвердили действительность теоритической формулы, несмотря на некоторую дисперсию, увеличивающуюся по мере уменьшения отрезков времени. Так, например, в 75 % случаев, количество $ETR + ETP$ можно оценить исходя от $(1 - a)\,Rg$, с точностью до 1 мм/в день, даже для отрезков времени очень непродолжительных (9 дней). Коэффициенты корреляций между этими двумя величинами превышают обычно 0,8. Анализ месячных величин выявляет постоянное отклонение, связанное должно-быть с эволюцией температуры воздуха по сезонам. Статистическое изучение разниц между $ETR + ETP$ и $(1 - a)\,Rg$ указывает на существование хорошей корреляции между этой переменной и температурой воздуха с одной стороны, и относительной влажностью — с другой, при условии введения для каждой из этих данных соответствующих порогов. Пороги эти, которые необходимо предварительно определить, соответствуют средним величинам, уже определенным при помощи теоритического анализа. Можно значит предвидеть применение этого метода при относительно коротких отрезках времени, но для этого необходимо располагать дополнительными измерениями.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Archer Ph., Grebet Ph., Samie C., 1970. Évapotranspiromètre à capteur dynamométrique. In *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A., Paris, 267-273.

Bouchet R. J., 1963. Évapotranspiration réelle et potentielle : signification climatique. *Assemblée Générale de Berkeley, Ass. int. Hydrol. sci.*, **62**, 134-142.

Bouchet R. J., 1964. Évapotranspiration réelle et potentielle : facteurs climatiques. In *L'Eau et la production végétale*, I. N. R. A., Paris, 155-166.

Brochet P., Gerbier N., 1972. Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **23** (1), 31-49.

Fortin J. P., 1973. *La détermination de l'évapotranspiration réelle en vue de son application à des modèles paramétriques de synthèse des débits en hydrologie.* Thèse de Doctorat de Spécialité. 114 p. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

Morton F. I., 1965. Potential evaporation and river basin evaporation. *J. Hyd. Div. ASCE*, **91**, HY6, 67-97.

Morton F. I., 1969. Potential evaporation as a manifestation of regional evaporation. *Water Resources Res.*, **5** (6), 1244-1255.

Morton F. I., 1970. Catchment evaporation as manifested in climatological observations. *Symposium de Reading sur le bilan hydrique mondial. Ass. int. Hydrol. sci.*, **93**, Vol. II, 421-433.

Nixon P. A., Lawless G. P., 1968. Advective influences on the reduction of evapotranspiration in a coastal environment. *Water Resources Res.*, **4** (1), 39-47.

PENMAN H. L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.*, **4** (1), 9-29.

PRIESTLEY C. H. B., TAYLOR R. J., 1972. On the assessment of surface heat-flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, **100** (2), 81-92.

RIOU Ch., 1972 *a*. Quelques exemples d'application des mesures de rayonnement à la détermination de l'évapotranspiration en climat tropical. *Bull. Ass. int. Hydrol. sci.*, **17** (2).

RIOU Ch. 1972 *b*. Étude de l'évaporation en Afrique Centrale. *Cahiers ORSTOM, Ser. Hydrol.*, IX (2).

SEGUIN B., 1975. Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale de l'évapotranspiration potentielle. Accepté pour publication dans *Agric. Meteorol.*

SOLOMON S., 1967. Relationship between precipitation, evaporation and runoff in tropical-equatorial regions. *Water Resources Res.*, **3** (1), 163-173.

Ann. agron., 1975, **26** (5), 555-591.

INFLUENCE DES CONDITIONS ÉCOLOGIQUES ET DE L'HISTOIRE CULTURALE SUR LE RENDEMENT DU MAÏS-GRAIN. ANALYSE DE 8 CAMPAGNES SUR UN ESSAI DE LONGUE DURÉE

J. BOIFFIN et M. SEBILLOTTE

avec la collaboration technique de Bernadette BOUSTANY [1], Camille DUBY [1], Anne EYRAL [2], H. GASNIER [3], MM. LASSUS [4]

Chaire d'Agriculture,
Institut national agronomique Paris-Grignon,
16, Rue Claude Bernard,
75231 Paris Cedex 05

RÉSUMÉ

Sur un champ d'essai de longue durée l'étude du rendement du maïs montre l'existence d'un effet année prédominant vis-à-vis des traitements expérimentaux. L'analyse de cet effet année conduit à privilégier la sécheresse et la densité de peuplement. L'application d'un modèle de forme générale :

$$R = \mu + \alpha P + (\beta + \gamma P)\ D$$

(avec R = rendement, P = précipitations cumulées sur différentes périodes, D = densité de peuplement à la récolte) permet de choisir la période sur laquelle il faut cumuler les pluies pour avoir le meilleur ajustement. On constate que, dans cette région, les pluies déterminantes pour le rendement sont celles qui tombent du 10 juillet au 5 septembre.

L'étude de la variation des densités de peuplement à la récolte montre l'influence prépondérante, sur les sols de limons battants, des pluies durant les 6 jours qui suivent le semis, leur effet étant accru si le sol est déjà humide ou sa structure affinée en surface. Lorsque le maïs suit un retournement de prairie, on obtient presque toujours de faibles peuplements, que l'année soit sèche ou humide. Des éléments d'explications sont fournis qui conduisent à opposer la stabilité structurale du lit de semence à la stabilité structurale de la terre. Cette variation des densités de peuplement engendre une variation des rendements et l'on retrouve l'existence d'une densité optimale, mais de valeur variable selon la sécheresse de l'année.

Il n'y a d'influence des traitements (différentes modalités de restitution de la matière organique et différence de fertilisation) sur les rendements du maïs que s'ils modifient la densité de peuplement. Ce point est discuté.

Enfin diverses considérations méthodologiques sont développées.

(1) Chaire de Mathématiques I. N. A. Paris.
(2) Chaire d'Agriculture I. N. A. Paris.
(3) S. U. A. D. de l'Ain.
(4) Agriculteurs à Montluel (Ain).

I. — INTRODUCTION

En 1963 était implanté à Montluel (Ain) un dispositif expérimental de longue durée destiné *à mesurer et à comprendre l'influence de différents régimes de restitutions organiques sur la fertilité* d'un sol limoneux très battant, à tendance hydromorphe.

Au départ, les observations portant sur les cultures visaient simplement à contrôler l'action des rotations culturales sur le sol et à tester le caractère globalement favorable ou défavorable des traitements par une mesure des rendements des cultures.

Très rapidement, il est apparu nécessaire d'opter pour une autre conception de l'approche de la fertilité d'un milieu en raison des très nombreuses interactions qui se sont manifestées, en particulier entre le climat et les traitements. Il en est d'ailleurs résulté un alourdissement du travail d'observation et de mesure.

Ainsi, la question initiale s'est trouvée déplacée, en ce sens que, pour y répondre, il est apparu nécessaire d'analyser *les relations climat-sol-plante en conditions variables d'histoire culturale.*

Dans le travail qui suit, cette analyse porte sur les 8 premières annéees (1964-1971) de culture de maïs-grain.

II. — MÉTHODE

Une présentation générale est actuellement en préparation où seront détaillés la conception du dispositif et l'ensemble des contrôles qui y sont réalisés. Nous nous limiterons ici à l'exposé des éléments indispensables à la compréhension de l'étude qui suit.

1. — *Le dispositif*

Implanté chez un agriculteur, il comporte les traitements suivants définis par les rotations et le régime de restitution organique :

— *Rotation A :*
maïs, blé, colza, blé, pailles enlevées.

— *Rotation B :*
maïs, blé, colza, blé, pailles enfouies.

— *Rotation C :*
rotation A + 4 ans de fétuque des prés — trèfle blanc.

En outre, la fertilisation est apportée à deux niveaux sur chaque culture sauf sur les prairies. Sur maïs, on a les quantités suivantes (kg/ha) :

	N	P	K
Niveau 1	104	150	144
Niveau 2	152	210	216

Chaque culture étant présente chaque année, il y a donc 16 parcelles par bloc, chacune étant subdivisée transversalement par la présence des deux niveaux de fertilisation. Le dispositif comporte deux blocs (bloc 1, horizontal ; bloc 2, en pente légère, exposé au Nord). Les parcelles mesurent 10 m de large sur 70 m de long et permettent donc l'emploi des outils de l'exploitation.

Les principales caractéristiques du sol au départ sont les suivantes :

— *Granulométrie* (p. 100 de terre fine sèche — fraction minérale)

argile	9,75
limon	24,75
sables très fins	48,80
sables fins	15,10
sables grossiers	1,60

absence totale de graviers et de pierres.

— *Matière organique :*

1,8 p. 100 ; C/N 12,6

— *Calcaire :*

absence totale.

pH (KCl) = 4,8 ; pH (H_2O) = 6,0.

Ce sol très battant présente souvent dans la couche travaillée, en hiver et au printemps, des pseudo-gleys. A partir de 35 cm de profondeur, on y trouve des concrétions ferromanganiques abondantes et volumineuses, sans que celles-ci constituent un alios continu.

2. — *Les techniques culturales concernant le maïs*

— *Variété : INRA 258* de 1964 à 1971.

— *Densité de semis :* environ 75 000 graines mises en terre par ha, au semoir de précision (0,80 m entre lignes).

— *Travail du sol :* labour à 22-25 cm (voir les dates de réalisation dans le tableau 2), sur déchaumage pour les rotations A et B, sur passages de rotavator (destruction du mat prairial) pour les maïs de rotation C. Préparation du lit de semence avec vibroculteur, herse, et croskillette si nécessaire, en un nombre de passages aussi faible que possible.

— *Les dates de semis* sont consignées dans le tableau 2.

— *Désherbage* aux triazines (2,5 à 3 kg de produit commercial/ha). Aucune espèce résistante n'étant jusqu'à présent apparue sur le dispositif, les résultats de cette opération ont toujours été excellents.

— *La fertilisation* est apportée pour la majeure partie sur le labour (engrais ternaire complet). Un complément phospho-azoté est apporté au semis en localisation avec de l'aldrine.

— *Un traitement anti-pyrale* (DDT jusqu'en 1971) est réalisé à la main ou par avion. Dans la période considérée, les dégâts causés sur le dispositif par ce parasite ont été minimes.

— *La récolte* est réalisée à la moissonneuse-batteuse, sur les quatre rangs du centre de la parcelle. Les mesures de rendements élémentaires (rendement d'un niveau de parcelle) sont donc faites sur une surface de 112 m².

3. — *La démarche d'analyse*

On dispose d'un ensemble de données, en particulier des rendements en maïs-grain par parcelle élémentaire (rotation-niveau-bloc).

Le rendement d'une culture est la résultante des actions et interactions des facteurs et conditions du milieu sur la croissance et le développement du peuplement végétal. Le dispositif introduit quatre sources de variations : l'année, le niveau de fertilisation, la rotation et le bloc, qui sont chacune à l'origine d'une certaine amplitude de variation dans les rendements.

La première partie du mémoire sera consacrée à la détection du facteur ayant le plus d'effet

sur le rendement et à l'étude de cet effet. Celui-ci sera analysé au niveau des composantes du rendement. L'étude de ses interactions avec les traitements du dispositif viendra, enfin, préciser ses mécanismes.

Après avoir ainsi détecté les mécanismes prédominants de l'élaboration du rendement, une interprétation des résultats de l'analyse statistique de l'effet des traitements sera alors possible. Ce sera la seconde partie du mémoire.

III. — LES RÉSULTATS

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DE DEUX FACTEURS PRÉPONDÉRANTS POUR LE RENDEMENT :

— LE CLIMAT

— LE PEUPLEMENT

A. — Mise en évidence des facteurs prédominants de variation des rendements

La comparaison des rendements en grain du maïs (fig. 1) — moyenne des deux blocs (1) — selon les traitements fait ressortir d'une manière prépondérante un effet année :

— les variations inter-annuelles, pour tous les traitements, sont très importantes et largement supérieures aux variations entre traitements, aussi bien fertilisation que rotation.

Les rendements moyens des deux années extrêmes (1965 et 1969) diffèrent de 52,3 q, soit 88 p. 100 du rendement moyen général pour toutes les années.

— L'étendue de la gamme de variation entre les résultats extrêmes d'une année est variable d'une année à l'autre ; le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'indice annuel :

$$i = 100 \times \frac{\text{rendement maximum} - \text{rendement minimum}}{\text{rendement moyen de la même année}}$$

Année	64	65	66	67	68	69	70	71
Valeur de i	27	27	53	51	22	89	31	21

(1) Les rendements par parcelle élémentaire sont donnés en annexe 1.

Les classements obtenus entre les traitements sont eux-mêmes variables d'une année à l'autre.

Ces observations restent valables si nous considérons les blocs séparément.

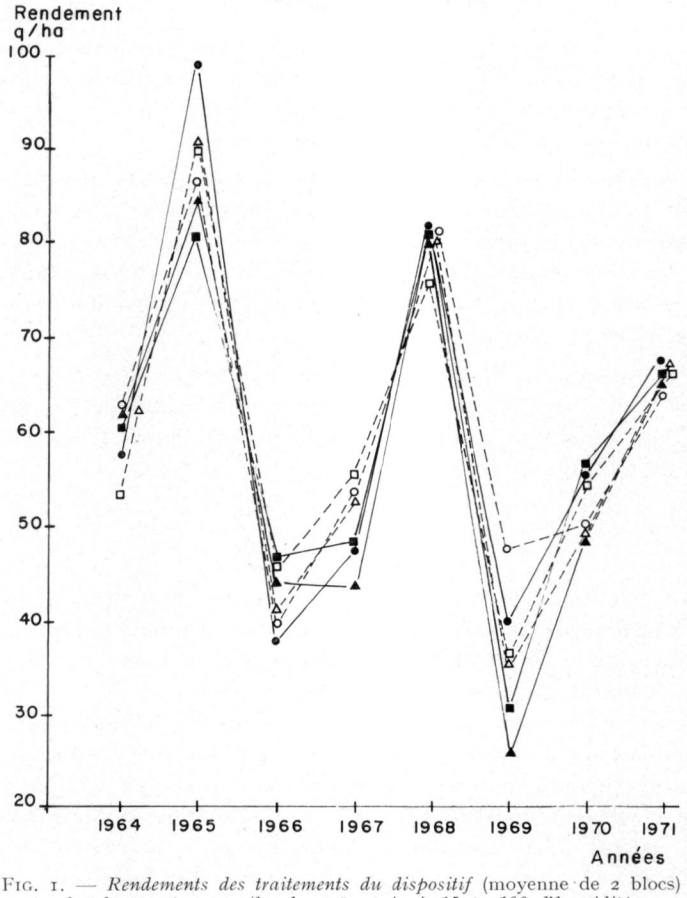


FIG. 1. — *Rendements des traitements du dispositif* (moyenne de 2 blocs) *selon les années, en q/ha de maïs-grain à 15 p. 100 d'humidité*

	N_1	N_2
A	▲	△
B	■	□
C	●	○

N_1 ———
N_2 — — —

Rotation A : maïs, blé, colza, blé (pailles enlevées)
Rotation B : maïs, blé, colza, blé (pailles enfouies)
Rotation C : rotation A + 4 ans de fétuque des prés — trèfle blanc

L'analyse des variations de rendement débutera donc par l'étude de cet effet année. Comme il s'agit de l'élaboration du rendement d'une culture et que les techniques sont sensiblement constantes, les années seront d'abord caractérisées par les variations climatiques et principalement par les hauteurs de pluie (composante la plus variable du climat de cette région).

B. — Étude des composantes de l'effet année

1. — *Inventaire*

a) *La sécheresse.*

Le maïs, plante d'été, réalise sa photosynthèse en période de forte évapotranspiration potentielle. Ainsi, tout ce qui intervient sur l'alimentation hydrique de la plante est-il susceptible de jouer sur le rendement en grain.

La sensibilité du maïs à la sécheresse est de deux types :

— au cours d'une période dite « critique », le manque d'eau peut entraîner une réduction du nombre de grains qui n'est que partiellement compensable par une croissance supérieure des grains formés (Robelin, 1963). Cette période débute au moment de la différenciation des fleurs femelles (10-15 jours avant la floraison mâle), couvre la pollinisation et se termine après les tout premiers stades de formation des grains (10-15 jours après la floraison mâle [1]) ;

— sur l'ensemble du cycle végétatif, la quantité de matière sèche fabriquée est liée au rapport des évapotranspirations réelle et maximale par l'intermédiaire de la régulation stomatique. On a la relation suivante (Robelin et Collier, 1958 ; Bouchet, 1963 ; Puech et Hernandez, 1973) :

$$\text{Matière sèche} = a\,\frac{\text{ETR}}{\text{ETM}} + b$$

Si cette relation est applicable à de courtes périodes au sein du cycle végétatif, on peut penser que c'est aux périodes où la production de matière sèche est la plus forte qu'un déficit hydrique aura le plus de conséquences, c'est-à-dire, *grosso modo*, de fin juin à mi-septembre.

Lorsque l'on fait varier par irrigation, sous un même climat sec, la quantité d'eau disponible pour les plantes, on vérifie la relation précédente et on constate, en outre, que le rapport grains sur matière sèche totale est peu variable : 50-55 p. 100, en l'absence d'accidents majeurs affectant la fécondation, qui entraînent alors une chute de ce rapport (Puech, 1968). Il en résulte que tout ce qui va perturber la croissance des plantes risque de se répercuter sur le rendement.

La composante sécheresse de l'effet année, vis-à-vis du maïs, sera donc liée :

— *à l'ETP* qui caractérise pour une part le climat de chaque année et conditionne l'ETM ;

— *à l'ETR* qui met d'abord en jeu le climat de l'année (pluviométrie, volume et répartition).

Le tableau 1 indique que ces caractéristiques ont effectivement beaucoup varié d'une année à l'autre ;

— *à l'exploitation de l'eau du sol par la plante*, elle-même fonction de l'enracinement (profondeur, répartition) et des autres facteurs qui agissent sur la valeur instantanée de la réserve facilement utilisable (RFU) ;

[1] Au cours de cette période, des accidents climatiques tels que vents très chauds peuvent avoir une action destructrice directe des tubes polliniques. De tels événements n'ont pas été enregistrés à Montluel.

TABLEAU I

Variabilité du climat estival à Montluel
lors des 8 premières campagnes du dispositif

Années	Pluies juillet (1) (mm)	Pluies août (1) (mm)	ETP-P (2) juil. + août (mm)
1964	37,5	51,0	179
1965	109,0	82,0	31
1966	59,0	43,5	119
1967	47,0	86,5	112
1968	50,5	122,5	82
1969	12,5	61,5	168
1970	34,5	83,0	126
1971	38,0	86,5	138

(1) P : pluviomètre situé à 200 m du dispositif.
(2) ETP : données de Lyon (formule de Turc).

TABLEAU 2

Indications sur cycle végétatif du maïs

Année de récolte	Date de semis	Sommes de température du semis au 31 juillet (1)	Date de récolte	Sommes de température du semis à la récolte (1)
1964	12-05	1 540	25-09	2 570
1965	30-04	1 540	13-10	2 620
1966	01-05	1 560	15-10	2 870
1967	22-04	1 700	28-09	2 760
1968	23-04	1 650	14-10	2 770
1969	12-05	1 420	15-10	2 720
1970	resemis le 25-05	1 280	15-10	2 610
1971	10-05	1 500	07-10	2 722

(1) En degrés-jour. Données météorologiques de Lyon.

— *à la position du cycle végétatif,* en particulier du stade critique vis-à-vis des événements climatiques. Deux aspects sont à considérer : d'une part la période de floraison qui est liée au climat moyen de l'année à partir du semis (somme de température) et donc en partie à la date de semis, d'autre part les accidents climatiques (sécheresse, vent chaud...) qui peuvent survenir et dont l'effet sur le rendement dépendra du stade du maïs au moment où ils se produiront (tabl. 2).

Il est donc intéressant de dater la floraison. La réalisation de ce stade s'est produite entre le 14 et le 31 juillet et, en général, dans la dernière décade ;

— *au peuplement,* composante importante du rendement dans le cas du maïs. On sait qu'à une disponibilité donnée en eau correspond, vis-à-vis du rendement

TABLEAU 3

Peuplements annuels des parcelles de maïs
(milliers de pieds/ha)

Année	Nombre de pieds sur toute la surface des parcelles (1 000 pieds/ha)				Nombre de pieds de la surface récoltée
	Moyenne annuelle	Valeurs extrêmes		Amplitude de variation (1)	
1964	non compté (2)	—		—	—
1965	61,7	67,3	45,4	35	64,9
1966	non compté	54,2	32,6 (3)	50	42,4
1967	non compté	61,4	54,2 (3)	12	57,7
1968	45,0	53,7	31,6	49	50,4
1969	69,8	74,2	65,5	13	72,1
1970 1er semis	Ce premier semis, battu par les pluies, a donné de trop mauvais résultats et a été retourné				
1970 resemis	61,0	63,9	57,8	10	63,9
1971	76,1	78,4	69,6	12	76,1

(1) Étendue indexée de la gamme de variation, en p. 100 de la moyenne de l'année.

(2) Un comptage non exhaustif sur quelques parcelles situe le peuplement moyen à environ 66 000 pieds/ha.

(3) Le comptage n'ayant pas eu lieu cette année sur la totalité de la parcelle, ces chiffres correspondent aux peuplements récoltés.

en grain, un optimum de peuplement, dont la valeur croît avec la quantité d'eau disponible. Trop fort, le peuplement entraîne une réduction de l'alimentation hydrique de chaque pied et une baisse de rendement de la parcelle ; trop faible, il conduit à une sous-exploitation des potentialités photosynthétiques (absence de compensation par suite d'un tallage très faible).

Le peuplement visé au semis est chaque année de 75 000 pieds/ha. Or, le peuplement réel (tabl. 3) est le résultat :

— des conditions de germination et de levée qui sont très dépendantes du climat et de l'état du sol (humidité, finesse de la terre) ;

— de l'action de divers parasites et prédateurs (1).

b) *Autres composantes.*

D'autres composantes de l'effet année peuvent être aussi retenues : le parasitisme sur les plantes âgées (pyrale), les accidents tels que verse sous l'action d'orage, les conditions de récolte qui jouent sur les pertes lors de cette opération, mais également les variations de nutrition minérale liées à l'action du climat sur la dynamique de la matière organique et sur la nutrition hydrique de la plante, et enfin, l'action directe du climat sur la croissance du maïs aux premiers stades (température).

Ces composantes non chiffrées ou insuffisamment sur le champ d'essai ne sont pas retenues dans un premier temps pour l'étude statistique de l'effet année.

2. — *Essai de traitement statistique*

a) *Principe.*

On a cherché à quantifier l'importance, considérée *a priori* comme prépondérante, de la sécheresse estivale et du peuplement annuel réalisé. A titre de première approche on a calculé un coefficient de corrélation simple entre :

— d'une part le rendement moyen annuel de l'ensemble des parcelles ;

— d'autre part, soit le déficit ETP-P (2) cumulé sur 2 mois (juillet-août), soit les pluies cumulées sur cette même période.

Dans le premier cas (rendement × déficit), le coefficient est de —0,724, significatif à 5 p. 100 ; dans le second (rendement × pluies), il est de 0,883, significatif à 1 p. 100.

L'échelle d'application de l'ETP Turc, le recours nécessaire aux données de Lyon, le fait que les réserves du sol n'ont pas été prises en considération, limitent la validité de ce critère « déficit climatique » ainsi appliqué à une parcelle. Au contraire, les pluies sont relevées sur place ; elles ne sont pas indépendantes de l'ETP locale qu'elles contribuent à abaisser ; en dehors des orages, un volume élevé des précipitations mensuelles est l'indication d'un certain étalement dans le temps des pluies ; enfin et surtout, dès qu'on s'intéresse à une période au début de laquelle les réserves du sol sont épuisées, elles constituent une approche de l'ETR : autant de raisons pour qu'elles soient en liaison étroite avec les rendements. On retient donc la pluie comme critère climatique représentatif de l'intensité de la sécheresse.

(1) On essaie de corriger les attaques de certains prédateurs (lapins, corbeaux) par des repiquages de plantes prélevées sur les rangs de bordure.

(2) ETP Turc calculée mensuellement à partir des données de Lyon.

On se propose alors d'étudier les liaisons existant entre le rendement des parcelles élémentaires, la quantité de pluie au cours de différentes périodes du cycle végétatif et le peuplement, en testant l'adéquation d'une relation de la forme :

$$R_{ijkn} = \mu_p + \alpha_p P_{p,\,n} + \beta_p D_{ijk,\,n} + \gamma_p P_{p,\,n} \cdot D_{ijk,\,n} + X_{ijknp}$$

où R_{ijkn} est le rendement dans la parcelle de la rotation i, du niveau de fertilisation j, du bloc k, de l'année n ;

$\mu_p, \alpha_p, \beta_p, \gamma_p$ sont des coefficients caractérisant la période p retenue au sein de l'année ;

$P_{p,n}$ est la hauteur de pluies sur la période p retenue au sein de l'année n;

$D_{ijk,n}$ est le nombre de pieds (ramené à l'hectare) récoltés sur chaque parcelle élémentaire, l'année n ;

X_{ijknp} est la variable aléatoire résiduelle qui traduit l'écart entre la valeur ajustée par le modèle et la valeur réelle du rendement R_{ijkn}.

La variance V_p de cette dernière variable, dite variance résiduelle, dépend de la période p retenue. Son estimation fournit une mesure de degré d'approximation que le modèle utilisé permet d'obtenir, si on la compare à la variance de R_{ijkn} que nous appellerons variance initiale.

Ainsi, si l'on compare plusieurs périodes p, la comparaison des V_p nous indique quelle est celle qui, dans le cas du modèle retenu, est la plus déterminante vis-à-vis des rendements (V_p la plus faible).

Ce modèle traduit, bien que sommairement, l'interaction possible entre les pluies et le peuplement vis-à-vis du rendement en grains. En effet, ils peut s'écrire sous la forme générale suivante :

$$R = \mu + \alpha P + (\beta + \gamma P)D$$

qui indique bien que le coefficient d'action du nombre de pieds dépend des pluies. Ceci revient à :

— considérer que, pour une année n donnée, la fonction $R_n = f(_n)\,(D)$ est assimilable à un segment de droite ; ce choix est justifié ici par l'allure des liaisons annuelles entre rendement et peuplement (fig. 2) ;

— imposer à ces droites des conditions communes d'appartenance à une famille définie par l'ordonnée à l'origine $\mu + \alpha P$ et la pente $\beta + \gamma P$.

C'est vraisemblablement à ce dernier niveau qu'une imperfection s'introduit. Nous l'accepterons en précisant que l'objectif visé n'est pas tant de traduire finement l'action du peuplement, que de l'introduire de manière à réduire la variance résiduelle et étudier plus correctement l'action des pluies. Un modèle plus fouillé devrait comporter des termes en D^2 pour tenir compte de l'allure parabolique des variations du rendement en fonction du peuplement, constatée par plusieurs auteurs pour de fortes gammes de variation (LASCOLS, 1960).

En définitive, la forme retenue ne peut qu'améliorer l'étude de l'action des pluies par rapport à la forme sommaire de la régression simple :

$$R = \mu + \alpha P$$

La construction des périodes « p » s'est faite en considérant la sensibilité du maïs à la sécheresse, de la manière suivante :

— une période de base a été fixée du 21 au 31 juillet. Elle englobe presque tous

les ans la floraison mâle et serait donc, dans la grande majorité des cas, au cœur de la période critique ;

— à partir de la séquence pivot, on a constitué des périodes *p* de plus en plus larges en lui ajoutant progressivement les séquences consécutives antérieures ou (et) postérieures. Nous obtenons ainsi 108 périodes *p*, constituées par la combinaison de 9 dates d'origine (du 11-6 au 21-7) et de 12 dates de fin (du 31-7 au 25-9). Ces 108 périodes ont en commun d'inclure la dernière décade de juillet ; elles sont récapitulées dans l'annexe 2.

Il a été supposé qu'en dehors de la période enveloppe du 11 juin au 25 septembre, la fabrication de matière végétale était trop faible pour intervenir dans la relation globale étudiée.

L'année 1964 a été écartée, les peuplements n'ayant pas été relevés. Elle est en outre la première année du dispositif, donc *a priori* particulière.

b) *Résultats.*

Le modèle a été appliqué aux 108 périodes définies précédemment, et pour chacune, on obtient une variance résiduelle à l'issue de l'analyse de covariance. L'annexe 2 (page 591) donne ces variances résiduelles.

On remarque, si l'on compare les colonnes (définies par la date de fin de période « *p* ») les unes aux autres, et de la même manière les lignes entre elles (définies par une date de début de période « *p* »), que l'on a une allure générale comparable :

— les colonnes ont un caractère commun : la plupart de leurs minima correspondent soit au 11-7, soit au 16-7 comme date initiale ;

— il en est de même pour les lignes : d'une manière générale, on enregistre, pour des dates terminales antérieures au 25-8, de fortes valeurs, hormis un minimum situé dans la colonne 5-8 qui apparaît presque systématiquement pour chaque ligne. Lorsque la date terminale varie du 20-8 au 31-8, la variance chute brusquement. Un groupement de valeurs très basses est enregistré dans les colonnes 31-8 et 5-9. Pour des séquences se terminant plus tardivement, la variance remonte légèrement tout en gardant des valeurs faibles, eu égard à la variance initiale.

c) *Discussion.*

Cet ensemble de résultats oriente le choix de l'époque de l'été encadrant chaque année les périodes dont la pluviométrie aura été déterminante vis-à-vis du rendement-grain.

Le début de cette période « enveloppe » peut être fixé au 16-7 (le 11-7 serait également très acceptable). *Sa fin peut être fixée aux alentours du 5-9.*

En effet, le groupe cohérent de faibles valeurs enregistrées pour des dates ultimes variant du 31-8 au 15-9 suggère fortement que la réduction sensible des variances résiduelles à partir du 25-8 ne résulte pas d'une pure coïncidence entre les rendements et les résultats du modèle.

Au contraire, le groupe de valeurs faibles enregistré dans la colonne 5-8 de l'annexe 2 (page 591) est trop restreint pour ne pas être suspecté. Effectivement, on constate qu'une corrélation positive ($r = + 0{,}36$) s'enregistre entre la pluie de la période du 16-7 au 5-8 et les nombres de pieds récoltés la même année, alors que cette corrélation est nulle entre les pluies du 16-7 au 5-9 et ces mêmes nombres de pieds.

L'existence d'une covariance positive entre les deux variables explicatives diminue la variance résiduelle de la variable expliquée (le rendement). Or, cette corrélation entre les pluies estivales et un peuplement qui s'est élaboré antérieurement, n'a agronomiquement aucune signification. La diminution de variance résiduelle qui en résulte n'est donc pas interprétable. En conséquence, il nous semble plausible de ne pas retenir, en tant que *période explicative* des variations de rendement, celle qui s'étend de mi-juillet au 5 août (qui suggérait l'importance de la période critique), mais d'arrêter notre choix à la période qui va du 16-7 au 5-9.

Le modèle prend alors la forme :

$$R = 25{,}06 + 0{,}203\ P - 0{,}126\ D + 0{,}00215\ NP$$

R en q/ha à 15 p. 100 d'humidité,
P en mm,
D en milliers de pieds/ha.

d) *Conclusion.*

Les quantités d'eau disponible pour les plantes apparaissent ainsi comme *une composante majeure de l'effet année.* Leur importance est, en moyenne, beaucoup plus forte que celle de la densité de peuplement à la récolte. La prise en considération simultanée de ces deux facteurs permet, à travers le modèle testé, une forte réduction de la variance initiale (environ 85 p. 100 de diminution) et ceci alors qu'on n'a pas tenu compte des différences entre traitements (sinon celles s'exprimant sur les densités de peuplement) : ces composantes représentent donc l'essentiel de l'effet année.

La considération des pluies cumulées, comme approche de l'ETR en période estivale et sous ce climat, est justifiée par là-même. L'ensemble des hypothèses de départ peut être conservé.

C. — Étude des variations du rendement déterminées par la densité de peuplement

On sait que, dans le cas du maïs, la densité de peuplement joue un rôle important vis-à-vis du rendement en grain ; on a d'ailleurs déjà introduit cette composante dans le modèle élaboré pour l'étude de l'effet année. Les effets des traitements ne peuvent donc s'analyser correctement que si l'on connaît, année par année, l'incidence de la densité sur le rendement.

Dans une première phase, on examinera les variations de densité entre les années et entre les traitements, pour étudier, ensuite, les relations existant entre les rendements et les densités de peuplements.

1. — *Étude des variations de la densité de peuplement*

a) *Résultats.*

Variations interannuelles.

Le tableau 3 (p. 562) récapitule pour chaque année, les nombres de pieds des rangs récoltés (moyenne annuelle des parcelles ramenée en milliers de pieds à l'hectare),

la densité moyenne annuelle de l'ensemble de la parcelle (c'est-à-dire y compris les rangs non récoltés), l'amplitude de variation entre parcelles, exprimée en p. 100 de la moyenne de l'année.

On note :

— que le peuplement de 75 000 pieds/ha qui correspond au nombre de graines mis en terre, est rarement atteint ;

— que les variations interannuelles sont importantes ;

— que l'hétérogénéité, au sein des années, est le plus souvent forte les années à faible peuplement, faible les années à fort peuplement.

Variations entre parcelles une même année.

Les densités de peuplements des diverses parcelles chaque année sont indiquées sur les figures 2, p. 576 et 577. Les analyses de variance effectuées chaque année en prenant comme résultat élémentaire le peuplement d'un niveau (une demi-parcelle) donnent les résultats suivants (tabl. 4) :

TABLEAU 4

Analyse de variance sur les peuplements selon les divers traitements

Années	Effets significatifs à 5 p. 100	Classements significatifs à 5 p. 100 (les peuplements approximatifs des traitements sont indiqués entre parenthèses en milliers de pieds/ha)
1965	Rotation	B < A et C (56) (64) (65)
1966	Rotation et bloc	C < A B intermédiaire (38,5) (46) (44) B_2 < B_1 (36) (50)
1967	Interaction, bloc × rotation	B_1 : B < A C intermédiaire (54,5) (59) (58,5) B_2 : A ≃ B ≃ C (à 58)
1968	Rotation, bloc, interaction bloc × rotation	B_1 : C < A et B (42) (53) (48,5) B_2 : B < A et C (32) (47,5) (47,5)
1969	Rotation	C < A et B (67) (71) (72)
1970	Rotation	C < B A intermédiaire (59) (63) (61)
1971	Rotation interaction bloc × rotation	B_1 : C < A et B (70,5) (78) (77) B_2 : C ≃ A ≃ B (77) (78) (76)

On observe :

— que toutes les années où les comptages ont eu lieu, l'histoire de la parcelle (traitement rotation) a eu une influence significative sur la densité de peuplement obtenue à la levée ;

— que cette influence est souvent accompagnée, voire modulée, par celle de la position de la parcelle sur le terrain (effet bloc). D'ailleurs, l'interprétation doit être prudente car l'interaction bloc-rotation se confond avec l'effet parcelle ;

— que les classements entre traitements sont, dans le détail, assez variables : les répercussions des successions de culture sur la phase semis-germination-levée dépendent donc du climat et de ses interactions avec les techniques culturales employées ;

— que, néanmoins, les rotations où le maïs est précédé d'un enfouissement important de matière organique (et surtout la rotation C où le maïs suit la prairie), conduisent, dans de nombreuses situations, à des densités de peuplement inférieures à celles des rotations A (sans enfouissement de paille).

b) *Discussion.*

Influence des conditions annuelles.

On cherche, en général, à réaliser la densité de peuplement par le semis d'un nombre de grains proche du nombre de pieds souhaités. Ceci suppose que les conditions de germination et de levée ne soient pas limitantes.

Pour cette analyse, on reprendra, en le détaillant de manière appropriée au cas étudié, le graphe élaboré par MANICHON et SEBILLOTTE (1973).

On a recensé les composantes des situations culturales susceptibles de rendre plus ou moins favorables les conditions de germination et de levée ; en particulier, les composantes climatiques dont l'action est directe (température, humidité minimum...) ou indirecte (effet sur l'état du sol), ont été déterminées pour différentes périodes avant et après le semis. Les composantes retenues, leurs valeurs ou les observations qui leur correspondent, chaque année, sont consignées dans le tableau 5.

La confrontation de ces informations aux valeurs des densités de peuplement obtenues (tabl. 3, page 562) montre d'emblée que les années à peuplement peu dense et irrégulier (66,68 et 1er semis 70) correspondent à une forte pluviométrie peu après le semis. A l'inverse, les années à fort peuplement (69,71) présentent une faible pluviométrie après le semis. Pour les années à peuplement moyen, s'échelonnant de 58 à 65 000 pieds/ha (65,67 et resemis 70), la pluviométrie suivant le semis est variable, plutôt faible.

En calculant les coefficients de corrélation entre :

— d'une part les valeurs de la densité de peuplement de chaque parcelle élémentaire,
— d'autre part certaines données permettant de caractériser les précipitations après le semis,

on obtient les corrélations négatives suivantes :

— corrélation : *peuplement* × *somme des pluies 6 jours après semis* :

$$r = -0{,}88 \qquad \text{HS}$$

— corrélation : *peuplement* × *somme des pluies 10 jours après semis* :

$$r = -0{,}84 \qquad \text{HS}$$

TABLEAU 5. — *Conditions régnant lors de la phase germination-levée du maïs*

Année	Date semis	Temp. moyenne de la décade (°C)		Pluies (mm) avant semis			État hydrique probable du sol en surface au semis	Tech. cult. pour préparation du lit de semence	Pluies (mm cumulés) après semis				Dégâts parasites
		avant semis	après semis	30 j.	10 j.	3 j.			6 j. Toutes pluies	10 j. Toutes pluies	10 j. P ⩾ 10 mm	15 j. Toutes pluies	
1964	12-5	14,5	17,3	53,5	29	9	Sol humide assez mal ressuyé en surface	?	0	13	13	44,5	Non
1965	30-4	8,4	13,5	50,5	29,5	17,5	Sol humide mal ressuyé en surface	4 passages vibro	20	20	11,5	20,0	Corbeaux (assez importants sur certaines parcelles)
1966	1-5	11,8	13,4	67,5	8,0	0	Sol frais bien ressuyé en surface	1 passage vibro + croskillette	38	46	25	46,0	Non
1967	22-4	11,5	9,6	21,5	1,5	1,5	Sol très sec	2 passages vibro + croskillette	5,5	19,5	0	33,5	Non
1968	23-4	15,4	12,5	19,0	4	0	Sol très sec	2 passages vibro + croskillette 1 passage vibro + herse Rot. C. : pas. vibro + herse en plus	37,0	46,0	37	99,5	Corbeaux importance non notée
1969	12-5	14,7	14,5	104,0	25	5	Sol très humide moyennement ressuyé en surface	1 passage vibro + croskillette	0	0	0	16,0	? probablement (repiquage nécessaire)
1970 1er semis	9-5	12,6	14,5	113,0	40,5	22,5	Sol très humide, très mal ressuyé en surface	2 passages vibro	33,5	45,5	34	48,5	Non
1970 resemis	25-5	14,1	16,9	93,5	23,5	3,0	Sol très humide, moyennement ressuyé en surface	1 passage vibro supplémentaire	0	0	0	8,5	Non
1971	10-5	14,6	18,2	101,0	25,0	0	Sol très humide, bien ressuyé en surface	1 passage herse + croskillette 1 passage vibro + herse	0	12,0	12,0	23,0	Non

— corrélation : *peuplement* × *somme des pluies 10 jours après semis* (mais seulement pluie d'au moins 10 mm par jour) :

$$r = -0{,}67 \qquad \text{HS}$$

— corrélation : *peuplement* × *somme des pluies 15 jours après semis* :

$$r = -0{,}71 \qquad \text{HS}$$

L'influence des pluies faisant suite au semis apparaît donc comme un facteur important de limitation des densités du peuplement dans ce type de sol très battant.

Ceci étant, ce seul critère ne rend pas totalement compte de l'ensemble du classement des peuplements annuels : ainsi, l'année la plus sèche après semis (1970) ne correspond pas aux plus forts peuplements. De même, l'année la plus humide (1968) n'est pas la moins peuplée.

On est alors conduit à une recherche plus fine qui permette d'intégrer un plus grand nombre de facteurs. Le modèle élaboré consiste, en distinguant les deux étapes de la germination et de la levée, à établir une prévision qualitative de leur réalisation en tenant compte :

— des événements climatiques et de leur action directe sur les graines ou sur les plantules ;
— des relations terre-graines selon le climat et les états structuraux, eux-mêmes liés au climat, aux outils employés et aux traitements ;
— de l'évolution de la surface du sol sous l'action du climat ;
— d'une éventuelle action des parasites.

On a retenu, en particulier :

— que les années où des pluies battantes surviennent après le semis, leurs dégâts se classeraient moins selon la hauteur de pluie tombée qu'en fonction de l'état hydrique du lit de semence. Plus il est humide, moins la cohésion de ses agrégats est élevée, plus vite est atteinte la saturation qui permet la séparation des constituants granulométriques, enfin plus ses constituants organiques sont facilement mouillables. La stabilité structurale de cette terre limoneuse est d'autant plus faible que prédominent dans son histoire des phases humides (SEBILLOTTE, 1968). Ceci est invoqué pour classer différemment les peuplements de 1966 et 1968 ;

— que les années où les risques de battance sont faibles ou nuls, c'est au contraire la sécheresse qui limiterait le taux de germination-levée (cas du 2e semis de 1970).

Le tableau 6 présente sous forme synoptique les conséquences de ces prévisions pour les deux étapes considérées, germination et levée, ainsi que le classement probable entre années des densités de peuplements que nous en avons déduit.

La confrontation de ces prévisions (tabl. ci-dessous) avec les comptages réalisés sur toute la surface des parcelles (1) confirme l'intérêt du modèle élaboré pour classer les années et donc souligne la part prépondérante des facteurs retenus, en l'absence d'attaque parasitaire majeure. Néanmoins, ce modèle ne permet pas d'estimer quantitativement le nombre de pieds effectivement levés.

(1) Préférables, car pour rendre les rendements plus comparables, on choisit à la récolte les 4 rangs de la partie centrale de la parcelle qui minimisent la variation de peuplement entre parcelles. Ce n'est pas le cas pour 1966 et 1967 : seuls les comptages sur les rangs récoltés ont été effectués.

TABLEAU 6

Essai de prévision du classement des peuplements
(moyennes annuelles)

Année	Germination	Risques de battance	Levée	Peuplement prévisible
1964	Rapide (temp. élevée, humidité favorable)	Faibles	Rapide et bonne	Fort
1965	Assez lente (temp. plutôt froide, sol froid et humide)	Formation probable d'une croûte modérée	Assez lente, manques probables dus à battance et corbeaux	Moyen : — supérieur à 1966 et 1968 — inférieur à 1969 et 1971
1966	Assez lente (temp. fraîche), risques d'asphyxie	Très élevés, formation de croûte très probable (fortes pluies sur sol encore humide)	Mauvaise	Très faible
1967	Très lente (temp. froide), probablement hétérogène (sécheresse)	Faibles	Correcte pour les graines germées	Moyen, inférieur à 1969 et 1971 (mauvaise germination)
1968	Assez lente (sol chaud au semis mais refroidissement ensuite)	Très élevés, formation de croûte très probable. *Mais pluies sur sol sec*	Mauvaise	Très faible, mais probablement supérieur à 1966
1969	Correcte (temp. moyenne et sol humide)	Nuls	Peut-être légère limitation due à la sécheresse pour les germinations intermédiaires	Fort, légèrement inférieur à 1971
1970 (1er semis)	Risques d'asphyxie	Très élevés. Battance intense : fortes pluies sur sol très humide	Mauvaise	Très faible, inférieur à 1966 et 1968
1970 (resemis)	Correcte au début (temp. élevée et sol humide), ensuite limitation par sécheresse	Nuls	Peut-être limitation par sécheresse	Assez fort, inférieur à 1969 et 1971
1971	Conditions optima	Faibles (pluies modérées sur sol sec)	Très bonne, favorisée par l'humidité, la temp., l'absence d'obstacles	Très fort, proche du nombre de graines mises en terre

	Classement des années par ordre décroissant						
	1971	1964-1969	1970 2e semis	1965-1967	1968	1966	1970 1er semis
Valeurs prévisibles de la densité de peuplement	très proche de la densité de semis	proche de la densité de semis		moyen assez éloigné de la densité de semis	Très faible		
Valeurs observées de la densité de peuplement	76,1	non compté et 72,1	63,9	64,9 et 57,7	50,4	42,4	retourné

On comprend mieux, en définitive, la difficulté pour l'agriculteur, d'obtenir le peuplement visé. Ceci souligne l'importance des techniques de travail du sol pour la préparation du lit de semence et l'intérêt d'une absence de battance.

Influence des traitements expérimentaux.

L'influence des conditions climatiques de l'année sur la densité du peuplement ne rend pas compte des différences observées entre les parcelles des divers traitements chaque année.

L'examen du tableau 4 montre que :

— les peuplements des parcelles de la rotation A sont toujours, sauf en 1970 (2e semis), parmi les plus élevés ;

— ceux des parcelles de la rotation C sont les moins élevés sauf certaines années, (1967 sur les 2 blocs, 1968 et 1971 sur le bloc II). En 1965, le maïs de la rotation C est à part puisqu'il ne suit qu'une seule année de prairie ;

— les parcelles de la rotation B ont des peuplements souvent intermédiaires, fréquemment voisins des parcelles de la rotation A.

— les années 1966, 1967, 1968, 1971 : les peuplements observés diffèrent d'un bloc à l'autre.

On est donc conduit à rechercher, pour ces différents traitements, ce qui différencie les lits de semence réalisés et comment les états obtenus et leurs comportements sous l'action du climat de chaque campagne peuvent expliquer les variations de classements des traitements au cours des années.

Ce rôle du climat dans l'extériorisation des comportements incite, sur cette terre battante, à traiter séparément les années sèches et les années humides à la période du semis.

Semis suivis de climats secs et chauds (1969, 2e semis 1970, 1971).

Les parcelles semées derrière prairie (rotation C) sont significativement moins peuplées au cours de ces trois années, à une nuance près en 1971 (interaction bloc-rotation : la rotation C est au même niveau que A et B sur le bloc 2 et les rotations A et B ont sensiblement les mêmes peuplements).

Étant donné les caractéristiques climatiques de ces années, la seule action possible du climat serait une réduction de la germination-levée par défaut d'humectation

des graines ou dessèchement des tigelles et cela impliquerait que les parcelles de la rotation C soient semées plus superficiellement ou (et) que leur sol soit moins tassé sur la ligne de semis.

Les lits de semence sur prairie sont, généralement, plus profonds et plus meubles, avec une structure plus fine. En outre il reste, en surface, de nombreux résidus de feutrage racinaire qui gênent le passage du semoir de précision et conduisent souvent l'opérateur à relever son appareil, donc à semer moins profondément.

La présence de larves de taupins (Agriotes sp.) derrière prairie pourrait aussi être invoquée : les différentes observations qualitatives et le fait que, certaines années, les parcelles de la rotation C aient, dans l'un des blocs, des densités de peuplement comparables à celles des autres rotations incite à considérer, ici, l'action de ce parasite comme secondaire.

Ces éléments d'interprétation n'ont malheureusement donné lieu à des contrôles précis et chiffrés qu'à partir de la campagne 1972, faute de moyens de travail suffisants auparavant. On n'est donc pas en mesure d'attribuer à chacun la part exacte qui lui revient dans la détermination, chaque année, des différences de peuplement entre parcelles.

Semis suivis de fortes pluies (1966, 1968).

La rotation C a des peuplements inférieurs à ceux des autres rotations sauf sur le bloc II en 1968. En outre, le bloc II est systématiquement moins peuplé que le bloc I.

En climat pluvieux, on est conduit à penser que c'est par la formation d'une croûte de battance plus ou moins développée que les traitements vont se différencier. En l'absence d'observations directes et systématiques, on peut penser que la susceptibilité aux pluies variera comme les résultats des tests d'instabilité structurale.

Le tableau 7 fournit ces valeurs.

TABLEAU 7

Stabilité structurale des parcelles de maïs (1966 et 1968) (Indice Is)

Campagne de maïs	Bloc	Rotation			Age prairie rotation C
		A	B	C	
1966 : (valeurs moyennes de novembre 1965 et novembre 1966)	Bloc 1	11,1	10,0	15,0	1 et 2 ans
	Bloc 2	13,8	8,3	11,2	
1968 : (valeurs moyennes de novembre 1967 et novembre 1968)	Bloc 1	9,4	9,4	3,5	3 et 4 ans
	Bloc 2	9,2	9,5	5,0	

On constate bien l'action positive de la prairie lorsque son âge est suffisant (MONNIER, 1965). Par contre, on ne dégage aucune corrélation entre ces valeurs et les densités de peuplement du maïs.

Bien que les tests soient réalisés sur des échantillons de novembre et que la stabilité structurale varie au cours de l'année (HÉNIN et TURC, 1949 ; MONNIER, 1965), on est fondé à affirmer que le classement relatif de stabilité des parcelles avec et sans prairie n'est pas modifié au cours du temps (MONNIER, 1965 ; SEBILLOTTE, 1968).

Cette discordance peut avoir plusieurs origines :

— les valeurs données pour novembre sont des valeurs moyennes sur la profondeur de sol travaillé, mais le lit de semence correspond, lui, surtout aux couches les plus profondes sous la prairie et donc celles pour lesquelles la stabilité structurale est la moins augmentée (MONNIER, 1965) ;

— la battance met aussi en cause l'état structural du sol (taille des mottes, importance de la terre fine) et l'humidité des couches superficielles au moment des pluies battantes.

Or, d'une manière générale, la structure du sol derrière prairie est plus fine (BUI HUU TRI, 1968) (1), donc si les travaux du sol se font en conditions relativement sèches, on obtient en surface des particules de terre de plus petite taille et donc plus sensibles à l'action des pluies. On a d'ailleurs déjà indiqué que cette caractéristique avait été fréquemment observée et précisément les conditions de travail étaient relativement sèches ces deux années-là (tabl. 2, p. 561 et tabl. 7).

De plus, en 1968, la sécheresse du sol a obligé à un passage d'outil supplémentaire sur les parcelles de la rotation C. Une telle opération accroît toujours la quantité de terre fine et donc la sensibilité aux pluies.

La valeur inférieure des peuplements du bloc II peut se rapprocher de l'observation, faite en plusieurs occasions, qu'en période de dessiccation, la surface de ce bloc, exposée au Nord, sèche moins vite que celle du bloc I. Il est alors possible que les mêmes pluies de 1966 et 1968 aient eu un effet plus battant sur ces surfaces plus humides (SEBILLOTTE, 1968). L'absence d'effet bloc, les années sèches, après le semis, semble confirmer cette vue.

— On peut à nouveau invoquer l'action de parasites tels que les larves de taupins. Cependant, ici encore, une parcelle met en cause la prépondérance de cette hypothèse puisqu'en 1968, sur le bloc II, le peuplement est le même pour les 3 rotations.

Les autres années (1965, 1967).

Elles n'apportent pas d'éléments nouveaux sauf qu'elles contribuent à réduire l'importance de l'hypothèse d'une action décisive du parasitisme. En particulier, en 1967, *année froide*, les peuplements des rotations C sont parmi les plus élevés.

On notera également que le caractère défavorable des lits de semences plus fins des parcelles de la rotation C, ne peut avoir joué les années en question, étant donné la faible pluviométrie de la décade qui a suivi le semis et l'absence de pluie violente.

Conclusions sur l'effet des traitements.

Bien que des modifications importantes de la stabilité structurale moyenne de la couche labourée se soient déjà produites au cours de ces 8 premières années, cela ne

(1) Les travaux de cet auteur indiquent que cette action est limitée dans les textures limoneuses, néanmoins, nos observations de profils culturaux sous prairie montrent l'existence, dans la zone de forte colonisation par les racines, d'une structure finement agrégée. En outre, cette zone de terre fine contribue à réduire la cohésion générale de la bande de terre au moment du labour et donc, indirectement, à accroître la fragmentation du sol.

se traduit pas d'une manière nette sur le peuplement à la levée. Il est évident qu'au bout de plusieurs successions de prairies sur les parcelles de la rotation C, la situation peut évoluer différemment.

Pour ces 8 années on peut retenir :

— que les conditions instantanées d'état du lit de semence priment sur tous les autres facteurs ; l'infériorité de la rotation C serait probablement due :
  - à une augmentation de la quantité de terre fine dans le lit de semence, ce qui, dans ces sols, le rend plus sensible aux pluies battantes que sur les autres rotations,
  - aux reliquats de matière organique en touffe (mat) qui imposent souvent un semis plus superficiel, dangereux en climat sec après semis ;

— que l'exposition du terrain peut intervenir dans ces terres très instables, en modifiant la stabilité structurale instantanée par une évolution différente de l'humidité de la surface en période de dessiccation.

2. — *Relations intra-annuelles entre rendement et peuplement*

On a vérifié que le peuplement jouait un rôle dans la réalisation du rendement en modulant l'action des pluies. Par ailleurs, on a vu que les peuplements de chaque parcelle étaient liés aux traitements. Il apparaît intéressant d'étudier maintenant, au sein de chaque année, la liaison entre rendement et peuplement.

a) *Résultats et discussion.*

Tous traitements confondus, on a calculé les corrélations qui, chaque année, traduisent l'intensité de la liaison entre rendement et peuplement à la récolte.

TABLEAU 8

Liaison intra-annuelle rendement-peuplement

Année	Coefficient de corrélation Rdt × Nbre de pieds récoltés	
1964	Nombre de pieds non connu	
1965	0,61	S à 0,05
1966	0,92	S à 0,01
1967	— 0,20	NS
1968	0,81	S à 0,01
1969	— 0,71	S à 0,01
1970	0,02	NS
1971	— 0,55	NS (F théorique à 0,05 : 4,96 ; F calculé 4,54).

Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau 8. Les figures 2 portent en ordonnées les rendements, en abscisses les peuplements à la récolte pour chaque année de culture.

On observe que :

— de forts coefficients de corrélation positifs se présentent pour des années à peuplement très faible (1966 et 1968) quel que soit leur climat ; on est relativement loin de l'optimum de peuplement qu'aurait autorisé le climat, même en été sec (1966) ;

— un coefficient positif faible mais significatif est enregistré en 1965 dont le climat très favorable aurait probablement autorisé un surcroît de peuplement ;

— les coefficients faibles et non significatifs correspondent à des années où le peuplement est moyen à fort (1967-1970-1971), mais surtout moins variable d'une parcelle à l'autre que les autres années, à l'exception de 1969. L'absence de liaison apparente entre rendement et peuplement peut donc être en partie imputable à la faible gamme de variation de ce dernier ;

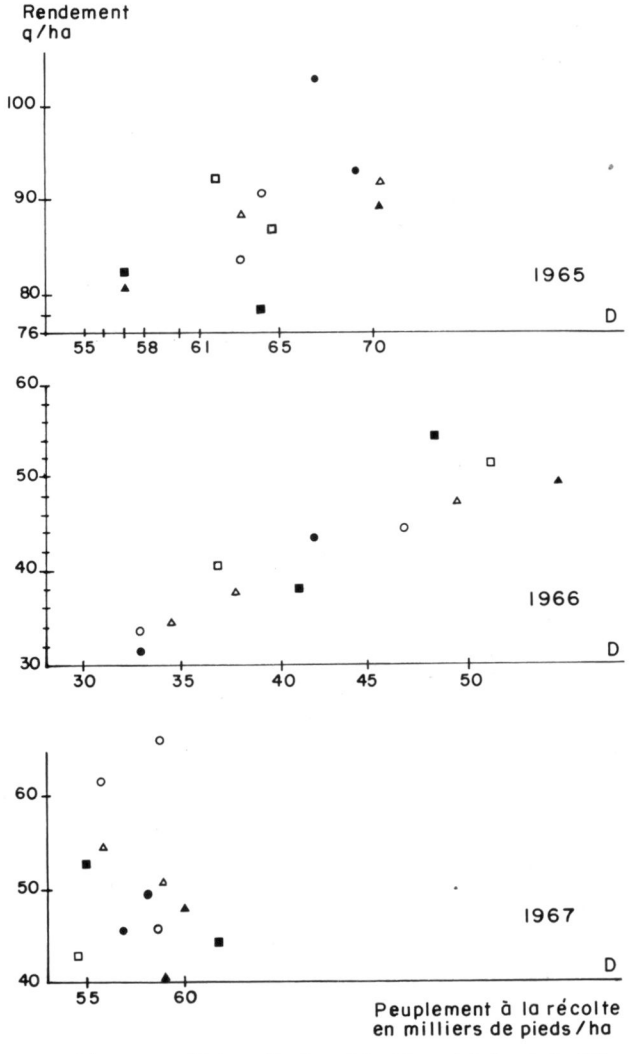


FIG. 2. — *Liaison Rendement-peuplement à la récolte* (D)

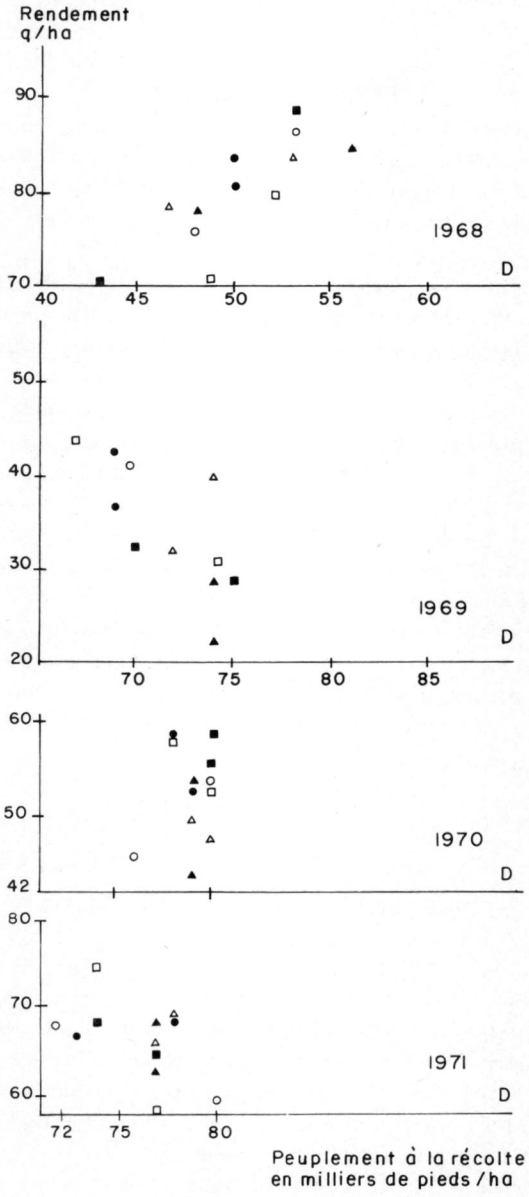
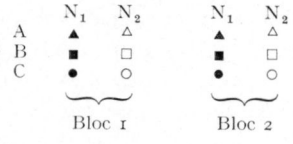


FIG. 2 (*suite*). — *Liaison Rendement-peuplement à la récolte* (D)



— en 1969, année très sèche, le fort peuplement accentue les effets du déficit hydrique. On est au-delà de l'optimum, ce sont les parcelles les moins peuplées qui obtiennent les meilleurs résultats.

b) *Conclusions.*

Dans 4 des 7 cas étudiés, on peut affirmer que les peuplements obtenus à l'issue de la phase semis-germination-levée, ne sont pas adaptés aux possibilités du climat de l'été (on n'est pas en mesure de préciser dans les autres cas, si le peuplement est éloigné ou voisin de l'optimum, la variabilité des peuplements obtenus étant insuffisante).

Lorsqu'elle peut être caractérisée avec certitude, cette mauvaise adéquation aux potentialités climatiques du peuplement réalisé, correspond dans 3 cas sur 4 à une insuffisance, imputable à un défaut de levée, les semis ayant été battus par les pluies.

Par contre, les peuplements annuels élevés s'accompagnent d'une liaison négative entre peuplement et rendement, peu intense si l'année est humide (1971), mais très forte en cas d'année sèche (1969). Il semblerait que, pour la variété en question (*INRA 258*) et à Montluel, le peuplement à rechercher se situe en moyenne aux alentours de 65 000 pieds/ha.

Globalement, le peuplement s'avère un facteur très important de différenciation intra-annuelle des rendements. Dans un bon nombre de cas (1966, 1968, 1969), l'intensité de la liaison entre rendement et peuplement est telle qu'elle explique à elle seule plus de 50 p. 100 des variations de rendement. En toute hypothèse, cette liaison éclipse alors les autres modalités d'intervention des traitements fertilisation et rotation.

DEUXIÈME PARTIE

ACTION DES TRAITEMENTS EXPÉRIMENTAUX SUR LA PRODUCTION DE GRAINS

A. — Position du problème : difficultés de l'étude

Ce qui a été exposé ci-dessus indique que l'action des traitements s'est exercée, d'une année à l'autre, dans un contexte très variable : à la diversité des climats enregistrés pendant l'été, agissant directement sur le rendement, s'ajoute celle des conditions de la phase semis-germination-levée. Celle-ci entraîne une forte différenciation interannuelle des peuplements obtenus, et par conséquent, pour un même climat estival, une variation des possibilités d'alimentation hydrique de chaque pied et de photosynthèse au niveau de la parcelle. La combinaison de ces deux facteurs de variation interannuelle (qui, tout en étant prépondérants, ne sont pas les seuls comme nous l'avons montré au début de ce travail), *fournit déjà une large gamme d'éventualités dont chacune justifiera une analyse particulière de l'action des traitements.*

Un deuxième problème résulte du fait que l'action des traitements est multiforme. Nous venons de mettre en évidence que les traitements avaient, certaines années, déterminé une forte variabilité de la densité de levée.

On ne pourra donc pas analyser de la même façon les répercussions des traitements sur les rendements selon qu'on se trouvera dans ce cas, ou au contraire, dans celui d'une année où les peuplements sont homogènes.

Enfin la qualité même des traitements a varié d'une année à l'autre, ce qui résulte de l'objectif initial du dispositif : si le traitement « niveau de fertilisation » garde une signification à peu près constante au cours du temps, il n'en est pas de même pour le traitement « rotations », qui est, par nature, de plus en plus marqué au cours du temps. La différenciation entre les traitements A et B est progressive : elle se réalise chaque année. Par contre, la différenciation entre les traitements A et C s'opère de façon plus saccadée et cette différence varie en période d'installation de l'essai : il faut attendre 1968 pour avoir un précédent prairie de durée constante et égale à 4 ans.

Il résulte de toutes ces remarques préalables que chaque année est, a priori, un cas d'espèce vis-à-vis de l'interprétation de l'action des traitements.

En conséquence, il ne convient pas d'appliquer à l'ensemble des résultats de ces huit années de résultats un traitement statistique factoriel global. Quitte à travailler sur de faibles effectifs, donc à utiliser des tests peu puissants, il nous a paru préférable de réaliser indépendamment, l'analyse de la variance sur les résultats de chaque année.

B. — Résultats

L'analyse de la variance opérée ici est celle d'un dispositif à trois facteurs (rotation, fertilisation, bloc) avec interactions d'ordre 2, sans répétitions [1]. L'interaction d'ordre 3 est donc confondue avec la variation résiduelle, et les tests de significativité sont peu puissants car le nombre de degrés de liberté de l'erreur est très restreint. Le risque de première espèce admis sera donc assez élevé (10 p. 100) pour obtenir une certaine discrimination des traitements. Le tableau 9 indique, année par année, quels ont été les résultats des tests « F » correspondant à chaque source de variation et la part de variation dont rend compte l'ensemble du modèle.

On vérifie dans l'ensemble ce qui était prévu dans le paragraphe précédent : la part des traitements retenus par le modèle dans la variation globale des rendements est extrêmement variable d'une année à l'autre. La nature des effets significatifs l'est également.

La part de variation dont rend compte le modèle utilisé (qui est d'autant plus forte que la variance résiduelle est faible par rapport à la variance totale) est très variable d'une année à l'autre. On remarque que pour les années où les variations de peuplement sont significativement corrélées à celles des rendements (1965, 1966, 1968, 1969), le modèle aboutit à une forte réduction de la variance. En ce qui concerne les autres années (1967, 1970, 1971), on observe deux cas où le modèle n'aboutit à aucune réduction de la variance (1967 et 1971), et un cas contraire (1970) où cette réduction est très forte. Cela nous incite à discuter successivement les résultats obtenus pour ces deux catégories d'années culturales.

[1] Sauf dans le cas de 1964 où le traitement « rotations » n'a aucune signification. Il s'agit alors d'un modèle à deux facteurs (niveau et bloc), une interaction, trois répétitions.

TABLEAU 9

Décomposition de la variance des rendements (Résultats des tests, année par année)

Origine de la variation	(°)	F théorique		Significativité des effets (1) (entre parenthèses : F calculé)							
		à 10 %	à 5 %	1964 (2)	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
Totale	11										
Rotations	2	9,00	19,00	—	NS (4,00)	S (31,4)	NS (0 à 1)	NS (4,6)	S (57,0)	S (19,9)	NS (0 à 1)
Niveaux	1	8,53	18,51	NS	NS (0 à 1)	NS (0 à 1)	NS (2,3)	NS (1,8)	S (56,1)	NS (7,6)	NS (0 à 1)
Blocs	1	8,53	18,51	NS	NS (0 à 1)	S (210,5)	NS (1,5)	S (14,0)	S (37,4)	NS (0 à 1)	NS (0 à 1)
Rotation × niveaux	2	9,00	19,00	—	S (9,1)	NS (1,9)	NS (0 à 1)	NS (0 à 1)	NS (2,3)	NS (3,2)	NS (0 à 1)
Rotation × blocs	2	9,00	19,00	—	NS (2,2)	NS (0 à 1)	NS (0 à 1)	S (27,5)	NS (6,9)	NS (3,6)	NS (0 à 1)
Niveaux × blocs	1	8,53	18,51	S	NS (2,4)	NS (1,5)	NS (2,2)	NS (7,6)	S (21,1)	S (36,8)	NS (0 à 1)
Erreur	2										
$\frac{\text{Variance résiduelle}}{\text{Variance totale}} \times 100$				73	31	4	100	7	4	11	> 100

(°) : *Degrés de liberté de la variance correspondante.*
(1) : S : test significatif à 10 p. 100. NS : F calculé inférieur au F théorique à 10 p. 100.
(2) : Cf. note en bas de page du texte, p. 579.

C. — Discussion

1. — *Rôle des traitements lorsque existe une corrélation rendement × peuplement*

L'examen de ces 4 années montre que, pour l'essentiel, les résultats des tests de l'analyse de variance opérée sur les rendements correspondent, lorsqu'ils sont significatifs, à des différences de peuplement à la récolte. On est alors renvoyé à l'analyse des relations traitements-peuplements, et à celle des relations peuplement-rendement (fig. 2).

Un seul fait échappe à cette règle : c'est l'influence positive de la fumure renforcée en 1969, particulièrement accentuée en bloc 2. Il s'agit d'une année très sèche et trois pistes nous semblent devoir être suggérées pour interpréter ces différences :

— la bande de terrain où se localisent les niveaux 2 du bloc 2 pourrait favoriser un enracinement plus profond, et donc entraîner une réserve utile plus importante ;

— étant située en bas de pente, cette même bande de terrain pourrait recevoir plus d'eau lors des pluies, du fait du ruissellement ;

— quant à l'effet de la fertilisation, il pourrait être dû à une faible minéralisation de la matière organique, en raison de la sécheresse et donc à un manque d'azote pour les niveaux 1, mais surtout sur le bloc 2, à un effet sur l'alimentation en eau (voir plus loin l'étude sur l'année 1970).

2. — *Rôle des traitements en l'absence de corrélation rendement × peuplement : cas des années 1967, 1970 et 1971*

Bien qu'étant caractérisé par une assez grande homogénéité des peuplements, ce groupe apparaît relativement hétérogène quant à la manière dont, chaque année, les parcelles se différencient les unes des autres.

Les points communs se définissent négativement :

— absence de différenciation nette entre les rotations A et C, et ce, alors même que le précédent prairie atteint une durée susceptible d'entraîner de sérieuses modifications des propriétés du sol (en 1970 et 1971) ;

— efficacité douteuse de la fertilisation renforcée : ce ne sont vraisemblablement pas les éléments majeurs N, P, K qui constituent les facteurs limitants de la production de grains les années en question ;

— l'essentiel des variations de rendement enregistrées peut être rapporté à des « effets parcelle » (cas de 1967 et 1971) ou à une position, sur le terrain, par rapport à la pente (cas de 1970). En somme, les hétérogénéités de fertilité au sein de ce dispositif, conçu très vaste pour de multiples raisons, pourraient bien être le facteur prédominant d'hétérogénéité des rendements les années en question.

L'année 1970 s'individualise nettement, d'une part en raison de la très forte interaction bloc × niveau mise en évidence, d'autre part en raison de la supériorité de la rotation B.

On peut se rappeler que l'été 1970 est marqué par une sécheresse assez forte, ainsi que par un semis tardif, ayant entraîné la croissance du jeune maïs en conditions de

forte E.T.P. Il est donc plausible que les variations de rendement traduisent surtout des variations d'alimentation hydrique selon les parcelles.

Comme celles-ci reçoivent les mêmes précipitations, on est conduit à penser que les variations d'alimentation hydrique sont liées aux interactions plante × sol :

a) *Différences de densité et de profondeur d'enracinement.*

Les profils culturaux réalisés le 29 juillet 1970 ne montrent pas de différences visuelles nettes entre les enracinements des parcelles sur les 35 premiers centimètres de sol.

b) *Différences de stades de développement entraînant des sensibilités différentes à la sécheresse.*

Les résultats d'une notation rapide des stades le 21 juillet ne permettent pas d'imputer à ce facteur un rôle déterminant.

c) *Différences d'utilisation de l'eau liées à des variations de croissance des parties aériennes*

Les mesures d'humidité réalisées le 29 juillet dans tous les niveaux 1 à mi-profondeur de la couche travaillée montrent que (fig. 3) :

— le sol est plus sec dans le bloc 2 que dans le bloc 1 ;
— les plantes les plus développées (hauteur) correspondent, fin juillet, aux sols les plus secs.

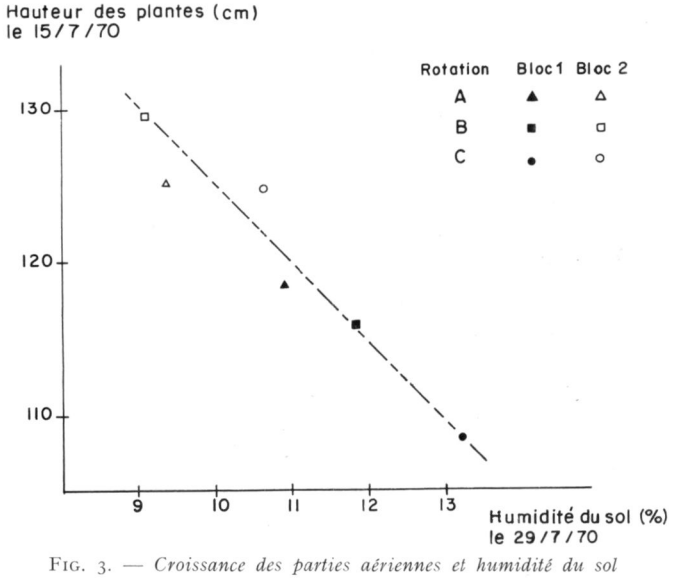


FIG. 3. — *Croissance des parties aériennes et humidité du sol*

La sécheresse générale de ce sol limoneux et l'absence de pluie durant la période de floraison incitent à penser que les conditions étaient défavorables en cette période de particulière sensibilité du maïs et qu'elles risquent donc d'avoir entraîné des chutes de rendements, variables selon le degré de sécheresse du sol de chaque parcelle.

On constate, en effet, (fig. 4) que, pour chaque rotation, les meilleurs rendements ont été obtenus sur le bloc 1 qui correspond aux parcelles les plus humides à la fin du mois de juillet.

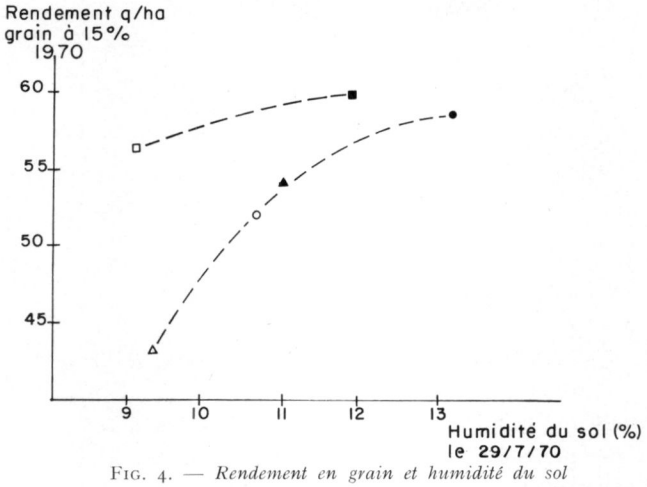


FIG. 4. — *Rendement en grain et humidité du sol*

Cependant, le comportement des parcelles de la rotation B tranche sur celui des autres parcelles : à même humidité fin juillet, on obtient des rendements supérieurs à ceux des autres rotations. Compte tenu des observations portant sur l'enracinement et sur les dates de floraisons, il n'apparaît pas possible d'interpréter cette particularité dans le cadre des hypothèses précédentes (*a*, *b*, *c*). Un tel classement de la rotation B n'est apparu qu'en 1970.

3. — *Résultats de 1964*

C'est la première année du dispositif, les traitements rotation n'ont pas de signification. L'analyse de variance révèle une forte interaction bloc-niveaux.

On retrouve la nette supériorité du niveau 2 du bloc 2 et du niveau 1 du bloc 1 comme en 1970 et pour une part, en 1969. Or, 1964 est une année sèche.

On a remarqué par ailleurs que, dans les deux bandes de terrain N_2 bloc 1 et N_1 bloc 2 qui se trouvent sur le sommet de la butte, l'horizon concrétionné était plus proche de la surface du sol. Il se peut alors qu'il en résulte une différence d'alimentation hydrique en année très sèche, soit par une variation de la réserve utile, ce qui semble peu probable, étant donné la nature de ces concrétions, soit par une réduction de la profondeur d'enracinement (COLLIER et ROBELIN, 1959).

4. — *Conclusion*

En dehors de leur influence sur les peuplements qui a des répercussions notables sur les rendements (mais très fluctuantes d'une année à l'autre), l'action directe des traitements fertilisation et rotation sur les rendements-grain du maïs est globalement très faible et n'est apparue que sous forme de cas isolés au cours de la phase étudiée. A titre d'illustration, voici les résultats moyens sur la période considérée :

Rendements moyens de huit années de production de maïs-grain (q/ha à 15 p. 100 humidité)

	Niveau 1	Niveau 2	Moyennes
Rotation A	57,2	60,1	58,7
Rotation B	59,1	60,1	59,6
Rotation C	61,0	60,9	61,0
Moyennes	59,1	60,4	59,7

IV. — CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans des conditions de fertilisation non limitantes, les facteurs prédominants de classement des rendements du maïs grain, en région lyonnaise et en sol limoneux, sont la pluviométrie estivale et la densité de peuplement.

Pour la pluviométrie, on retrouve les conclusions d'autres auteurs, obtenues à partir de protocoles expérimentaux différents : cases lysimétriques, essais au champ avec différentes doses d'irrigation qui, le plus souvent, portent sur un nombre restreint d'années.

Cette influence de la pluviométrie sur le rendement est due aux deux raisons suivantes :

— au début de la période de croissance active, les réserves en eau du sol sont épuisées et les précipitations cumulées constituent une bonne approximation de l'ETR dont on sait l'influence à travers le rapport $\frac{ETR}{ETM}$ (COLLIER et ROBELIN, 1959 ; ROBELIN, 1962 ; BOUCHET, 1964 ; PUECH *et al.*, 1968 ; TANAKA et YAMAGUCHI, 1972 ; PUECH et HERNANDEZ, 1973) ;

— dans la région lyonnaise, au cours des 8 années étudiées, il n'y a pas eu de sécheresse suffisante pour modifier le rapport, relativement constant, en l'absence d'accident climatique, entre grain et matière sèche totale (PUECH *et al.*, 1968).

La liaison linéaire trouvée entre les pluies et le rendement, à savoir pour des densités de peuplements de l'ordre de 60 000 pieds/ha :

$$R = 0{,}26\ P + 23{,}5$$

avec P = pluviométrie cumulée du 11 juillet au 10 septembre, rejoint les conclusions des divers travaux cités. Elle est intéressante car obtenue en négligeant les variations interannuelles d'ETP. Elle peut donc servir à faire des prévisions économiques de rendement ou encore à situer un rendement donné vis-à-vis des potentialités climatiques et donc à juger de l'éventualité d'action d'autres facteurs.

Le fait que la période d'influence des précipitations s'étende jusqu'en début septembre confirme que la photosynthèse tardive est importante comme l'ont montré TANAKA et YAMAGUCHI (1972).

L'influence de la densité de peuplement sur le rendement dans le cas du maïs a déjà été mise en évidence (LASCOLS, 1960 ; TANAKA et YAMAGUCHI, 1972) ; elle tient à l'absence de tallage et à la faiblesse des compensations entre les différentes composantes du rendement.

Les résultats obtenus montrent l'existence d'une liaison linéaire positive avec le rendement si la densité de peuplement est faible ou si l'été est pluvieux ; la liaison est négative en été sec si la densité est élevée. On retrouve l'intérêt, souvent souligné, d'augmenter la densité de peuplement lorsque l'alimentation hydrique n'est pas facteur limitant (CARLSON *et al.*, 1959 ; ROBELIN, 1962).

LASCOLS (1960) a montré l'existence d'une densité optimale pour un climat donné. Les rendements obtenus corroborent le bien-fondé de cette notion mais montrent le caractère contingent de sa valeur numérique qui dépend du climat de l'année. On est conduit, de ce fait, à suggérer le choix d'une densité de 65 000 pieds à l'hectare à la récolte, pour les 8 années étudiées et non de 75 000, comme le préconisent les normes de la vulgarisation locale pour cette variété.

On remarquera qu'au cours de ces 8 années, on a atteint le rendement maximal probable autorisé par la variété (année 1965).

Les traitements du dispositif : différences de restitution de matière organique et de fertilisation n'ont eu d'influence sur les rendements que lorsqu'ils ont aussi agi sur la densité de peuplement.

En particulier, la fertilisation élevée en azote n'a pas eu d'effet positif même en année pluvieuse, ce que l'on aurait pu attendre après les travaux de CARLSON (1959) qui a montré l'intérêt d'une fertilisation accrue sous irrigation.

On est tenté de penser que le niveau le plus bas de fertilisation azotée retenu et les quantités d'azote libérées dans le sol par l'évolution estivale de la matière organique sont suffisants vis-à-vis des conditions d'alimentation hydrique, et ceci, même dans les parcelles sans restitution de matière organique.

Les différentes modalités d'apport de matière organique n'ont pas eu de répercussion notable sur le rendement en grains. Cependant, il ne faut pas en conclure à l'inutilité d'un entretien organique du sol : sur une période plus longue ou pour les autres cultures de la rotation, les résultats peuvent différer.

Chaque année, les modalités de travail du sol pour la fabrication du lit de semence ont été, dans toute la mesure du possible, pour un dispositif expérimental implanté chez un agriculteur, choisies en fonction des propriétés du sol et des conditions climatiques.

Ces précautions nécessaires n'ont pas été suffisantes pour permettre une levée de tous les grains chaque année : les conditions climatiques qui entourent le semis restent prépondérantes et peuvent entraîner de très fortes variations : plusieurs dizaines de milliers de pieds par hectare.

Précisément, une des hypothèses de départ du champ d'essai était que l'introduction de la prairie temporaire pourrait augmenter la stabilité structurale du sol et donc améliorer son comportement battant.

Or, cette augmentation de la stabilité structurale, bien constatée, n'entraîne pas l'amélioration de comportement espérée parce que la prairie modifie également d'autres caractéristiques du milieu.

En effet :

— par la dessiccation supérieure du sol sous prairie, qui permet un travail en conditions sèches,

— par la réduction de l'épaisseur de la bande de labour non ameublie du fait de la destruction du mat avant le retournement,

— et enfin par l'affinement de la structure qu'engendrent ses racines (Bui Huu Tri, 1968),

— le précédent prairie entraîne un lit de semence plus fin et par conséquent, malgré l'augmentation de stabilité structurale, plus sensible à l'action dégradante des pluies.

Au contraire, dans les parcelles des rotations A et B, en raison de l'état structural compact du sol avant labour, de la reprise en masse de la bande travaillée lorsque le labour est suivi d'une période pluvieuse, de l'humidité plus élevée de ces parcelles, on obtient des éléments structuraux de taille moyenne supérieure à ceux formés en rotation C. De ce fait, malgré la faible stabilité structurale de la terre de ces parcelles, le comportement des lits de semence peut y être plus favorable que derrière prairie.

On est donc conduit à opposer à la stabilité structurale (Hénin *et al.*, 1961), propriété intrinsèque du matériau, la notion de stabilité du lit de semence qui met en cause de nombreux facteurs parmi lesquels la stabilité structurale n'a probablement plus la place prépondérante qu'on lui a donnée au moins dans ces sols et sous ce climat.

Cependant, ces constatations ne préjugent en rien de ce qui se passerait s'il y avait deux cultures successives de maïs derrière le précédent prairie ou lorsque le taux de matière organique aura été augmenté par un deuxième cycle prairial.

Par ailleurs, cette modification de la stabilité structurale et l'apport de matière organique dus au précédent prairie peuvent entraîner une amélioration de l'état du profil cultural lorsque le travail du sol est réalisé en conditions humides (Manichon et Sebillotte, 1973). Les observations réalisées confirment cette vue.

Si l'on joint à ces remarques la constatation, certaines années, d'un parasitisme accru sur les parcelles de la rotation avec prairie, on mesure la nécessité d'une meilleure définition de l'expression « précédent prairie » et l'importance des conditions d'implantation de la culture suivante sur l'extériorisation de l'effet précédent. On doit ainsi opposer, lorsque l'on parle de succession de culture, un effet précédent et un effet suivant.

Par effet précédent, nous entendons l'action, sur le milieu, de la culture et des techniques qui lui sont appliquées, tandis que l'effet suivant concerne le degré de sensibilité de la culture suivante avec ses techniques culturales aux différents états du milieu.

Enfin, sur le plan méthodologique, ce travail montre la nécessité, pour pouvoir interpréter des effets cumulatifs, d'être en mesure d'analyser *les processus d'élaboration du rendement des cultures* au champ. La conception appliquée ici est d'utiliser un tel dispositif comme cadre d'enquête, c'est-à-dire que les contrôles exercés le sont *a posteriori*, hormis ceux qui correspondent directement aux traitements. Une expérimentation destinée à étudier les effets de différents systèmes de culture, devrait ainsi être nécessairement traitée de cette manière, en laissant s'extérioriser

les effets cumulatifs, contrôlés à mesure de leur apparition et introduits comme covariables dans le modèle explicatif de l'élaboration du rendement.

Cependant, ceci n'est pas exclusif de l'effort nécessaire pour prévoir et réaliser le contrôle des facteurs et des conditions qui risquent, au vu des connaissances déjà acquises, de jouer un rôle pour les situations considérées, dans l'élaboration du rendement des cultures.

Reçu pour publication en septembre 1975.

SUMMARY

INFLUENCE OF ECOLOGICAL CONDITIONS AND CULTURAL PAST ON THE YIELD OF GRAIN MAIZE. ANALYSIS OF 8 TRIALS OF A LONG-TERM EXPERIMENT

The study of maize yield in a field submitted to a long-term experiment revealed a year effect prevailing over the experimental treatments. The analysis of this effect led to emphasize the two following factors : drought and population density. The application of a general model :

$$R = \mu + \alpha P + (\beta + \gamma P)\ D$$

(with R = yield, P = precipitations cumulated during different periods, D = population density at harvest) allowed to choose the period during which rains must be cumulated to obtain the best adjustment. It is noted that in this area the rains determinant of the yield fell between the 10th of July and the 5th of September.

The study of the variation of population densities at harvest shew the preponderant influence on silt soils of unstable structure of the rains falling during the 6 days after the sowing ; their effect being still increased when the soil is already humid or its structure loosened at the surface. When maize culture follows a 4-years ley the populations are almost always weak whether the year is dry or rainy. Some explanatory facts are given which lead to oppose the structure stability of the seed bed to that of the soil. This variation of population densities induces a variation n the yields and an optimum density is observed which however varies according to the year drought.

Treatments (different ways of providing organic matter and different fertilizing) only act on maize yield when they modify the population density. This fact is discussed.

Various methodological considerations are also set forth.

ZUSAMMENFASSUNG

EINFLUSS ÖKOLOGISCHER BEDINGUNGEN UND VORHERGEHENDER KULTUREN AUF DEN MAISSAMENERTRAG. ANALYSE VON 8 VERSUCHEN EINES LANGFRISTIGEN EXPERIMENTS

Die Untersuchung des Maisertrags in einem langfristigen Feldexperiment lässt einen Jahreffekt erkennen, der gegenüber den Versuchsbehandlungen vorherrschend ist. Die Analyse dieses Effekts bewirkt die Bevorzugung der Faktoren : Dürre und Populationsdichte. Die Anwendung ei eines generellen Modells :

$$R = \mu + \alpha\ P + (\beta + \gamma\ P)\ D$$

(mit R = Ertrag, P = Niederschläge, die während verschiedener Zeitabschnitte kumuliert worden sind, D = Populationsdichte zur Ernte) erlaubt den Zeitabschnitt zu wählen während dem die Niederschläge kumuliert werden müssen um die beste Ausgleichung zu erreichen. Es wurde festgestellt dass die ertragsbestimmenden Niederschläge in diesem Gebiet zwischen dem zehnten Juli und dem fünften September fielen.

Die Untersuchung der Schwankungen der Populationsdichte zur Ernte zeigt den vorherrschenden Einfluss von den während der 6 Tage nach der Aussaat gefallenen Niederschlägen auf Flottlehme ; dieser Einfluss ist noch grösser wenn der Boden schon feucht ist oder seine Oberflächenstruktur locker ist. Wenn die Maiskultur dem Umpflügen einer Wiese folgt sind die Bestände fast immer schwach sei das Jahr trocken oder regnerisch. Einige Erklärungen, die zum Entgegensetzen von der Strukturfestigkeit des Aussaatbetts und der des Bodens führen, sind gegeben. Diese Änderung der Populationsdichte verursacht Ertragsschwankungen und eine optimale Dichte, die aber von der Dürre des Jahrs abhängig ist, wurde festgestellt.

Die Behandlungen (verschiedene oganische Stoffzufuhrarten und verschiedene Düngung) beeinflüssen die Maiserträge nur wenn sie die Populationsdichte verändern. Diese Tatsache ist besprochen.

Verschiedene methodologische Erwägungen sind dann eingeführt.

РЕЗЮМЕ

Влияние экологических условий и применявшихся приемов культуры на урожаи кукурузного зерна. — Анализ 8-ми кампаний длительного опыта.

Ж. БУАФФЕН, М. СЕБИЙОТТ.

Изучение урожаев кукурузного зерна в длительном полевом опыте указывает на существование преобладающего годичного эффекта в отношении экспериментальных обработок. Анализ этого эффекта заставляет отдать преимущество засухе и плотности популяции. Применение общей модельной формулы : $R = \mu + \alpha P + (\beta + \gamma P) D$, в которой R-представляет урожайность, P-сумму осадков для разных периодов и D-плотность популяции в период сбора урожая, позволяет выбор периода куммуляции осадков, для лучшего урегулирования. Можно констатировать что в районе опыта наиболее решающие для урожайности дожди выпадают между 10-м июля и 5-м сентября.

Изучение изменений плотности популяции ко времени сбора урожая, показывает в почвах состоящих из суглинка с непрочной структурой, доминирующее влияние 6-ти дневных дождей, сразу после посева, причем эффект этих дождей усиливается в случаях уже увлажненной почвы, или почвы, структура которой получила поверхностное улучшение. В случаях когда кукуруза следует за запашкой луга, популяции ее всегда менее плотны, вне зависимости от того засушливый-ли год, или дождливый. Элементы об'яснений дающихся в данной работе, заставляют противопоставить прочность структуры ложа семени в почве и прочность структуры всей почвы. Вариации плотности популяции приводят к изменениям урожайности, и хотя и возможно найти оптимальную плотность, ее величина будет тоже меняться, в зависимости от засушливости года.

Обработки (различные способы возвращения в почву органического вещества, различия в удобрении) влияют на урожаи зерна кукурузы только в тех случаях, когда они изменяют плотность популяции. Проводится обсуждение этого пункта. И, наконец, рассматриваются вопросы методологического порядка.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. agron.*, **14** (5), 743-824.

BUI HUU TRI, 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. agron.*, **19** (4), 415-439.

CARLSON C. W., ALESSI J., MICKELSON Rh., 1959. Evapotranspiration and yield of corn as influenced by moisture level, nitrogen fertilization and plant density. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23** (1).

COLLIER D., ROBELIN M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques. *Ann. agron.*, 415-453.

HÉNIN S., TURC L., 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric.*, **35**, 597-599.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol.* Société d'Édition des Ingénieurs agricoles. Paris.

LASCOLS X., 1960. Densité de peuplement dans les cultures de maïs-grain. *Bulletin des CETA*. Étude n° 390.

MANICHON H., SEBILLOTTE M., 1973. *Étude de la monoculture du maïs. Résultats d'une enquête agronomique dans les régions de Garlin et de Navarrenx.* Document ronéotypé, Institut national agronomique, Paris-Grignon.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Paris.

PUECH J., MAERTENS C., FIORAMONTI S., MARTY J. R., COURAU M., 1968. Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées. *Ann. agron.*, **19** (3), 365-377.

PUECH J., HERNANDEZ M., 1973. Évapotranspiration comparée de différentes cultures et étude de quelques facteurs influençant les rythmes de consommation. *Ann. agron.*, **24** (4), 437-455.

ROBELIN M., 1962. Évaporation réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. *Ann. agron.*, **13** (6), 493-522.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du maïs-grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journ. internation. irrigation*, A. G. P. M., Pau, 69-76.

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Évapotranspiration et rendements culturaux. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, (20), 1774-1776.

SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. *Ann. agron.*, **19** (4), 403-414.

TANAKA A., YAMAGUCHI J., 1972. Dry matter production, yield components and grain yield of the maize plant. *J. Fac. agric. Hokkaido Univ.* (Sapporo, Jap.), **57**.

ANNEXE I

RENDEMENTS ÉLÉMENTAIRES A 15 P. 100 D'HUMIDITÉ (q/ha)

Maïs

Année	Niveau	Rotation A		Rotation B		Rotation C	
		Bloc 1	Bloc 2	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 1	Bloc 2
1964	1	62,50	61,02	63,97	57,35	62,50	53,67
	2	59,55	63,97	51,98	56,61	57,35	68,38
1965	1	80,95	90,08	82,84	78,87	94,22	103,32
	2	88,73	93,36	91,94	87,39	89,66	83,72
1966	1	49,88	38,07	55,12	39,34	44,16	32,15
	2	47,61	35,11	52,11	41,44	44,71	34,47
1967	1	40,28	47,86	52,63	45,10	49,92	45,80
	2	51,53	54,74	45,02	66,43	46,50	62,11
1968	1	84,98	77,58	89,27	70,28	80,70	84,07
	2	83,97	78,56	80,45	71,41	76,00	86,99
1969	1	28,69	23,15	29,44	33,52	36,63	42,81
	2	32,09	40,03	30,98	41,55	40,69	55,46
1970	1	54,35	43,67	59,31	56,40	58,71	52,86
	2	48,21	50,32	52,82	57,86	45,80	54,31
1971	1	68,38	63,25	68,38	64,57	66,60	68,72
	2	68,68	65,98	59,46	73,68	68,17	60,01

ANNEXE II

VARIANCES RÉSIDUELLES

Dates début (1)	Dates de fin de la séquence											
	31-7	5-8	10-8	15-8	20-8	25-8	31-8	5-9	10-9	15-9	20-9	25-9
21-7	238,19	115,71	268,41	282,18	298,18	188,69	89,20	97,92	128,94	99,63	99,56	109,83
16-7	107,42	47,38	167,36	123,47	187,47	82,33	64,50	48,24	74,84	57,55	59,20	67,60
11-7	73,79	60,44	195,97	163,60	207,36	89,00	76,00	49,43	71,22	61,05	60,70	72,37
6-7	134,77	57,36	166,89	163,94	198,35	114,88	57,37	67,44	95,34	75,42	76,06	85,21
1-7	152,28	82,84	166,28	164,07	181,22	117,42	55,03	72,38	101,14	78,66	78,72	87,26
26-6	167,63	141,57	262,55	240,87	275,67	189,04	131,60	93,71	112,48	93,32	82,14	96,50
22-6	104,43	79,26	238,84	248,13	273,90	135,15	83,46	70,39	97,59	81,10	81,61	94,28
17-6	207,26	235,22	337,44	295,17	296,23	220,06	118,12	104,03	130,90	107,57	111,60	124,54
11-6	250,05	264,07	333,01	284,37	277,75	142,58	196,54	74,04	92,92	78,52	82,17	96,67

(1) Dates début : Date de début de la séquence.

Variance générale des rendements = 369,31

Ann. agron., 1975, **26** (5), 593-615.

L'AUBERGINE (*SOLANUM MELONGENA* L.). INFLUENCE DE LA NATURE DU SUBSTRAT SUR LE COMPORTEMENT DE LA PLANTE

P. CORNILLON et J. P. LEY*

Laboratoire d'Agronomie,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
Domaine Saint-Paul,
84140 Montfavet

* *Laboratoire de Biométrie,*
Centre national de Recherches zootechniques, I. N. R. A.,
78350 Jouy en Josas

RÉSUMÉ

L'étude entreprise sur l'Aubergine en serre a permis de mettre en évidence l'influence du substrat, sol ou balle de paille, sur la croissance et le développement de la plante. Ainsi l'utilisation de la balle de paille provoque une modification profonde du rapport fruit-partie végétative par une amélioration des conditions de nouaison et par une réduction de l'importance des feuilles. Aussi pour une production de fruits plus importante sur paille, les besoins en éléments minéraux sont fortement réduits. Parallèlement, la balle de paille favorise l'accumulation de matière sèche dans les fruits et donne ainsi un légume plus intéressant du point de vue technologique. En outre, l'analyse factorielle des correspondances permet d'établir une liaison étroite entre élément nutritif et organe, ce qui facilite les possibilités de diagnostic pour l'agronome.

INTRODUCTION

L'Aubergine est un légume qui correspond bien aux besoins nouveaux du consommateur recherchant l'originalité de goût et la diversification de son alimentation. Aussi cette plante, autrefois typiquement méditerranéenne, voit son aire de culture et son époque de production s'étendre grâce à la culture sous serre (C.N.C.E., 1971), d'autant plus que les généticiens mettent au point un matériel végétal fixé à haut potentiel de production et dont les caractéristiques physiologiques sont modifiées pour accroître les possibilités de culture sous serre.

Les attaques de Verticillium, champignon vasculaire auquel l'Aubergine est

particulièrement sensible, et les mauvaises conditions de nouaison en culture sous abris au printemps, constituent deux problèmes majeurs qu'il faut résoudre pour permettre une extension accrue des surfaces cultivées.

La pratique agricole a montré que cette double difficulté pouvait être surmontée par la culture sur balle de paille. Les attaques de Verticillium sont ainsi arrêtées en raison de l'isolement du substrat de culture par un film plastique posé sur le sol. Par ailleurs, la culture sur balle de paille change profondément les conditions d'alimentation hydrique et minérale de la plante. Le comportement et l'équilibre végétatif de celle-ci se trouvent modifiés, la nouaison facilitée et les fruits présentent des caractères différents.

Aussi, pour mettre en évidence les effets du substrat sur la croissance et le développement de l'Aubergine, nous avons procédé à une étude du problème dans les serres expérimentales de Balandran (I.N.V.U.F.L.E.C.). Nous avons comparé, pour une culture « hâtée » dont la production a commencé au mois de mai et s'est poursuivie pendant l'été, le comportement de la plante sur sol et sur balle de paille.

Après avoir précisé les conditions expérimentales, nous présentons successivement d'une part les observations concernant la croissance et le développement : accumulation de matière sèche et élongation des plantes, rendement, précocité et caractéristique de la récolte, et d'autre part les conditions de nutrition minérale : rythme d'absorption, exportations globales et diagnostic foliaire.

MÉTHODOLOGIE

1. — *Choix des substrats*

L'essai mis en place au mois de mars s'est poursuivi jusqu'au début du mois d'août sous serre verre dans des conditions normales d'ensoleillement pour cette période de l'année. Les observations ont porté sur l'Aubergine hybride F_1 Baluroi, obtenue par la Station d'Amélioration des Plantes de Montfavet.

Parmi les substrats dont l'utilisation était possible : sol, mélange sol et pouzzolane, mélange pouzzolane et tourbe, balle de paille, nous avons retenu le sol et la balle de paille. En effet, la balle de paille est parfois utilisée pour la culture du Concombre mais surtout elle permet d'éliminer facilement les risques de Verticillium. En outre elle modifie profondément l'équilibre végétatif. Par contre le sol reste le substrat traditionnel de la serre. Dans notre expérimentation, le sol correspond à un limon décalcifié des Costières du Gard. C'est un sol de lehm sur gapan avec une forte perméabilité pour l'eau et une faible capacité d'échange.

2. — *Techniques culturales*

Les graines ont été semées le 29 décembre à une température de 20-22°C et les plantules repiquées le 13 janvier en motte de 8 cm × 8 cm. La mise en place a été pratiquée le 18 mars au stade premier bouton floral apparent, à la densité moyenne de 1,9 plants au mètre carré, avec 3 plants au mètre sur la ligne.

Fumure.

Avant plantation, la fumure suivante a été incorporée au sol :

0,33 kg/are	N	sous forme d'ammonitrate
0,45 kg/are	P_2O_5	sous forme de superphosphate
1,96 kg/are	K_2O	sous forme de sulfate de potasse
1,12 kg/are	MgO	sous forme de sulfate de magnésie
50 kg/are	Dolomie	le 23 avril

Les balles de paille 0,185 m³ (moyenne pression), isolées du sol par une feuille de plastique, ont reçu après un arrosage abondant (Minist. Agric. fish., 1970) :

165 g N	par balle de 25 kg	sous forme d'ammonitrate et nitrate
130 g P_2O_5		sous forme de superphosphate
220 g K_2O		sous forme de nitrate de potasse
28 g MgO		sous forme de sulfate de magnésie
80 g SO_4Fe		sous forme de sulfate ferreux

En cours de culture, plusieurs apports d'engrais en couverture ont été effectués entre le 8 mai et le 3 août, soit à l'are :

5,09 kg d'azote
0,47 kg d'acide phosphorique
3,52 kg de potasse

aussi bien pour le sol que pour les balles de paille. Dans ce dernier cas, les apports sont calculés en fonction de la surface, soit 0,56 m² par balle.

De plus, trois pulvérisations de sulfate de magnésie à 16 p. 100 ont été effectuées les 28 avril, 21 et 27 mai à raison de 10 g à l'are.

Des déterminations d'éléments solubles pendant la durée de la culture permettent de se rendre compte de la différence de composition qui existe entre les extraits de sol et ceux de la balle de paille (MUSARD *et al.*, 1972).

Les déterminations effectuées par le Laboratoire des Sols de la Compagnie Nationale du Bas-Rhône-Languedoc ont été faites sur un extrait obtenu avec un rapport substrat-solution de 1/5 pour le sol et de 1/50 pour la balle de paille. Il apparaît une concentration en sels nettement plus importante dans la solution de la balle de paille tout au long de la culture (tabl. 1).

TABLEAU I

Composition de la solution du substrat

	pH	Conductivité (millimhos/cm^{-1})	N (NO_3^-)	P	K	Ca	Mg	Na
			mg/kg de substrat					
Sol (extrait 1/5)	7,1	0,15	8	29,3	108	66	19	25
Balle de paille (extrait 1/50)	6,7	1,98	465	610	380	1 250	190	310

Irrigation.

La détermination des besoins en eau est effectuée à partir de la mesure du rayonnement global en utilisant la formule mise au point par la Station de Bioclimatologie de Montfavet.

L'arrosage par aspersion sur l'ensemble de l'essai a apporté 568 mm d'eau répartis de la façon suivante :

	Aspersion (mm)	Irrigation fertilisante par rampe perforée (mm)
Mars	48	
Avril	60	
Mai	66	40
Juin	96	60
Juillet	138	60

L'utilisation de l'irrigation fertilisante a parfois conduit à dépasser légèrement la valeur de l'E.T.P. calculée.

3. — *Prélèvements et analyses*

Pendant toute la durée de la culture, de nombreuses observations morphologiques et des prélèvements d'échantillons ont permis de suivre l'évolution des plantes et de comparer les deux traitements étudiés pendant la période allant du 1er avril au 28 juin 1971. L'échantillonnage est effectué à des stades phénologiques apparents : floraison et nouaison des différentes fleurs et grossissement du fruit. Chaque échantillon provenant de 3 à 8 plantes est rapidement divisé en tige, pétiole, limbe et fruit. Chaque fraction est ensuite lavée en frais, séchée et pesée en sec avant d'être soumise à l'analyse.

La détermination des éléments minéraux (P, K, Ca, Mg) et de l'azote organique dans les tissus végétaux est opérée en utilisant les méthodes mises au point par le Comité Inter-Institut (C.I.I., 1973).

Pour les fruits, selon le constituant analysé, nous utilisons, soit la pulpe homogénéisée en présence d'une partie d'eau, soit le jus cellulaire d'un échantillon de 15 fruits environ (AUBERT, 1971).

L'extrait sec, l'acidité libre et les protides sont mesurés selon les méthodes de l'A.O.A.C. (1970). Les sucres totaux sont obtenus après hydrolyse préalable à l'acide chlorhydrique des sucres non réducteurs.

4. — *Analyse factorielle des correspondances*

Pour l'interprétation statistique, nous avons eu comme idée directrice :

1. La comparaison de la croissance des plantes sur sol et sur balle de paille.
2. L'étude de l'accumulation des divers éléments nutritifs et leur distribution dans chacun des organes.

L'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances nous a permis de décrire les proximités existant entre certaines caractéristiques de la plante, compte tenu des poids différents de ces critères (LEBART et FÉNELON, 1973). Cette méthode permet d'effectuer des opérations purement descriptives sans hypothèse particulière préalable.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus proviennent d'une expérience en serre selon les conditions d'exploitation proches de la pratique culturale habituelle. Nos observations quantitatives ont porté uniquement sur la partie aérienne du végétal : tige, pétiole, limbe et fruits.

1. — *Cinétique de croissance*

a) *Production de matière sèche.*

Matière sèche totale.

La figure 1 donne l'évolution comparée de la production totale de matière sèche pour la période correspondant à la production du premier cycle de fruits des deux traitements. La croissance commence lentement surtout pour les plantes mises en place sur le sol. Mais des différences nettes apparaissent puisque 20 jours après la mise en place, le poids sec total varie entre 24,4 g pour les plantes sur sol et 40,3 g pour les pieds situés sur les balles de paille. Jusqu'au 35e jour, l'accumulation de matière sèche est plus grande dans les plantes installées sur balle de paille. Ensuite le phénomène s'inverse et en fin de cycle végétatif, la différence devient extrêmement accusée

au profit des plantes qui ont été installées sur le sol. A la fin du cycle végétatif, une plante sur sol a accumulé environ 600 g de matière sèche alors que sur la balle de paille nous avons seulement 430 g de produit sec par plante.

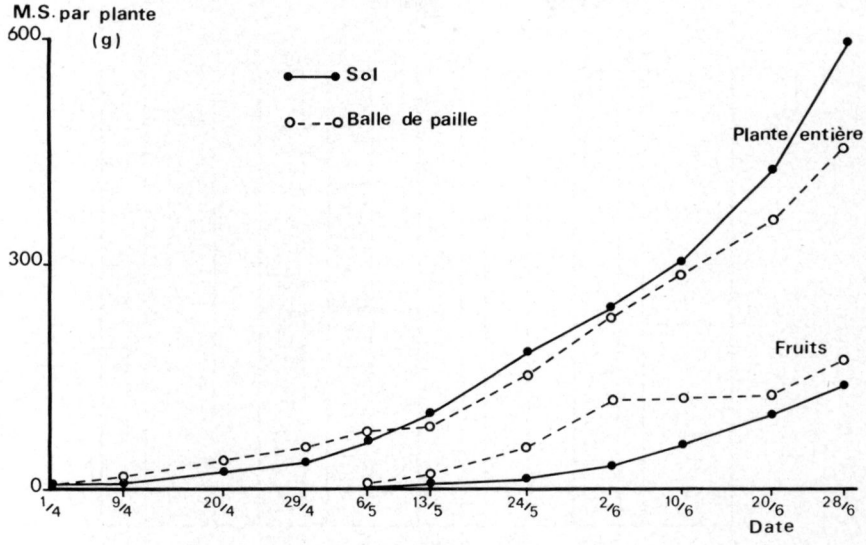


FIG. 1. — *Évolution de la matière sèche*

Répartition de la matière sèche.

Quand nous étudions la répartition de la matière sèche entre les différents organes de la plante, nous notons diverses évolutions (fig. 2). Quand la fleur du premier niveau est épanouie, le premier avril, la tige, le pétiole et le limbe ont une valeur relative très comparable pour les plantes soumises aux deux traitements.

Au cours de la croissance ultérieure, l'importance du limbe diminue tandis que le pourcentage de tissus conducteurs (tige et pétiole) varie assez peu. En outre, sur le sol, les fruits représentent entre 20 et 25 p. 100 de la matière sèche globale tandis que sur balle de paille, ce pourcentage s'élève de 40 à 45 p. 100.

L'accélération de la croissance et la répartition différente de la matière sèche synthétisée dans les plantes qui poussent sur balle de paille apparaissent particulièrement intéressantes sur le plan cultural. En effet, la récolte commence beaucoup plus tôt et le rendement est plus grand sur ce substrat. Ces effets peuvent être liés à la modification de certaines caractéristiques du substrat : température, concentration en éléments minéraux de la solution et teneur en CO_2 de l'atmosphère du substrat. La température des balles de paille est supérieure d'environ 6 à 7°C à celle du sol à cause des fermentations qui se produisent pendant l'évolution de la paille, tandis que la forte augmentation de la conductivité totale de l'extrait aqueux (tabl. 1) témoigne de l'augmentation de la concentration de la solution nutritive. Parallèlement, les fermentations qui se produisent dans la balle de paille modifient l'équilibre entre les teneurs de $[O_2]$ et de $[CO_2]$ dans la balle de paille.

Comme l'Aubergine est une plante exigeante en ce qui concerne la température du substrat, cette élévation de la température peut accélérer la croissance, surtout

au début du cycle végétatif quand la température se situe dans une zone critique. De même, l'augmentation de concentration dans la solution de sol diminue la pression osmotique (en valeur algébrique) et, par conséquent, modifie l'état hydrique de la plante en diminuant la consommation et la teneur en eau des tissus végétaux.

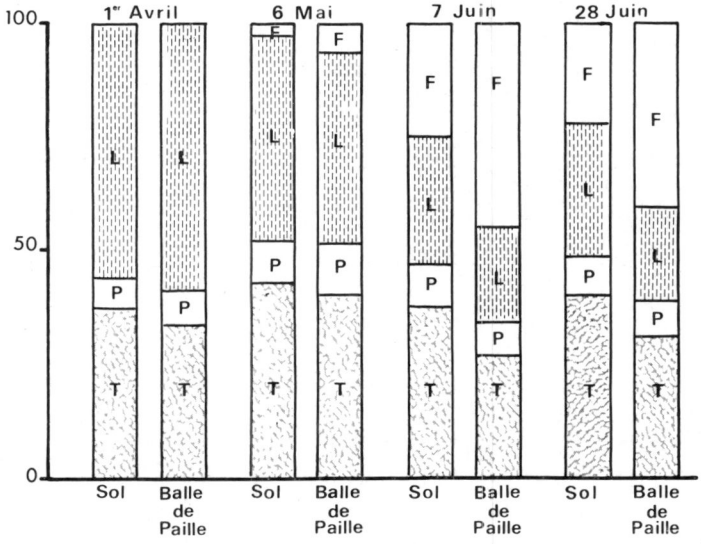


FIG. 2. — *Influence du type de substrat sur la répartition de la matière sèche entre les différents organes de la plante*

T : tiges
P : pétioles
L : limbes
F : fruits

En effet quand la pression osmotique de la solution nutritive passe de —0,24 bar (concentration 0,81 $g \cdot l^{-1}$; conductivité 1,15 mmho. cm^{-1}) à —1,46 bar environ (4,86 $g \cdot l^{-1}$; 5,50 mmhos. cm^{-1}) nous notons en culture hydroponique, une modification de l'état hydrique du limbe et de la consommation en eau. Les quantités de matières sèches subissent une augmentation sous l'action de la solution la plus concentrée pour deux variétés, *Dourga* et *Ronde de Chine*, dont le comportement hydrique est différent (POCHARD et SERIEYS, 1974). Les quantités d'eau du limbe varient entre 660 et 1 050 p. 100 du poids sec dans le cas de *Dourga* et entre 580 et 830 p. 100 pour la variété *Ronde de Chine* (POCHARD et CORNILLON, 1975). Parallèlement l'absorption d'eau pour la variété *Dourga* passe de 450 ml à 403 ml d'eau pour une période de 20 jours quand la concentration de la solution augmente. Dans les mêmes conditions, la variété *Ronde de Chine* consomme respectivement 966 ml et 730 ml d'eau.

Nous notons, comme LENZ (1970) l'avait déjà observé, que la matière sèche totale de la partie aérienne est plus réduite pour les plantes qui donnent la plus forte production de fruits. En effet, cet auteur avait provoqué une augmentation de la synthèse de matière sèche totale en supprimant les boutons floraux dès leur apparition sur la plante.

b) *Allongement de la tige.*

La figure 3 montre, en fonction du temps, l'évolution de la hauteur des plantes conduites en buisson avec suppression des bourgeons axillaires situés au-dessous de la première fleur selon le mode de conduite habituel.

L'observation des graphiques révèle que la balle de paille accélère la croissance au début de la période végétative, mais le rapport s'inverse après un mois de végétation. Ce résultat corrobore les cinétiques comparées de production de matière sèche. Ce phénomène est mis en évidence par l'analyse factorielle des correspondances (fig. 4). En effet, le premier axe sépare les courbes selon le traitement : croissance sur sol ou sur balle de paille, et les dates, selon qu'il s'agit du début ou de la fin de la croissance. Les proximités observées traduisent le fait que la croissance sur balle de paille est plus rapide au début et que le phénomène s'inverse ensuite. Le deuxième axe sépare dans le temps le comportement de chacun des individus et révèle en partie l'hétérogénéité relative du matériel végétal.

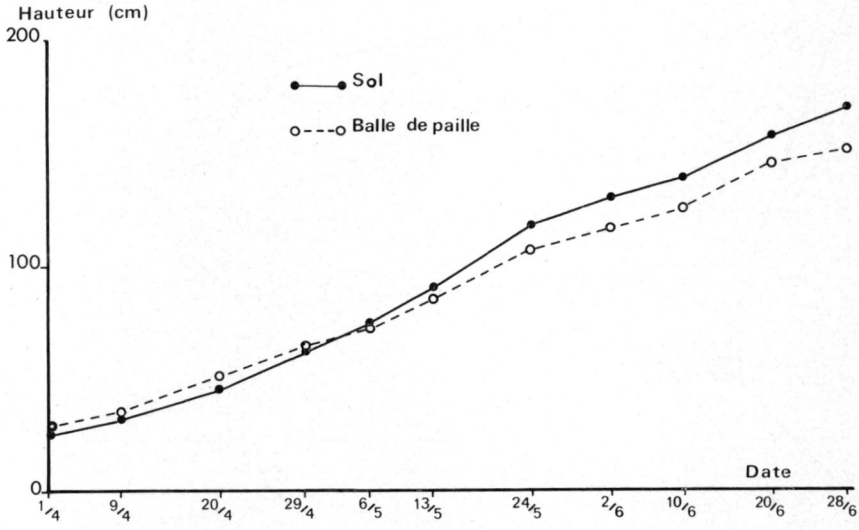


FIG. 3. — *Allongement des plantes*

2. — *Production*

La récolte a commencé le 14 mai pour les plantes élevées sur balle de paille et le 25 mai pour celles qui étaient installées sur le sol. Elle s'est poursuivie jusqu'au 12 août pour les deux traitements sur des parcelles comprenant 9 plantes.

Rendement.

Le rendement total, le nombre et le poids moyen des fruits par plante sont exprimés en valeur moyenne par pied d'aubergine avec une densité de 1,90 plantes au mètre carré (tabl. 2). Nous pouvons noter une action positive bien nette de la balle de paille sur le rendement et sur le nombre de fruits. Par contre, le poids moyen du fruit ne subit pas de variation notable en fonction du traitement et de l'époque de récolte.

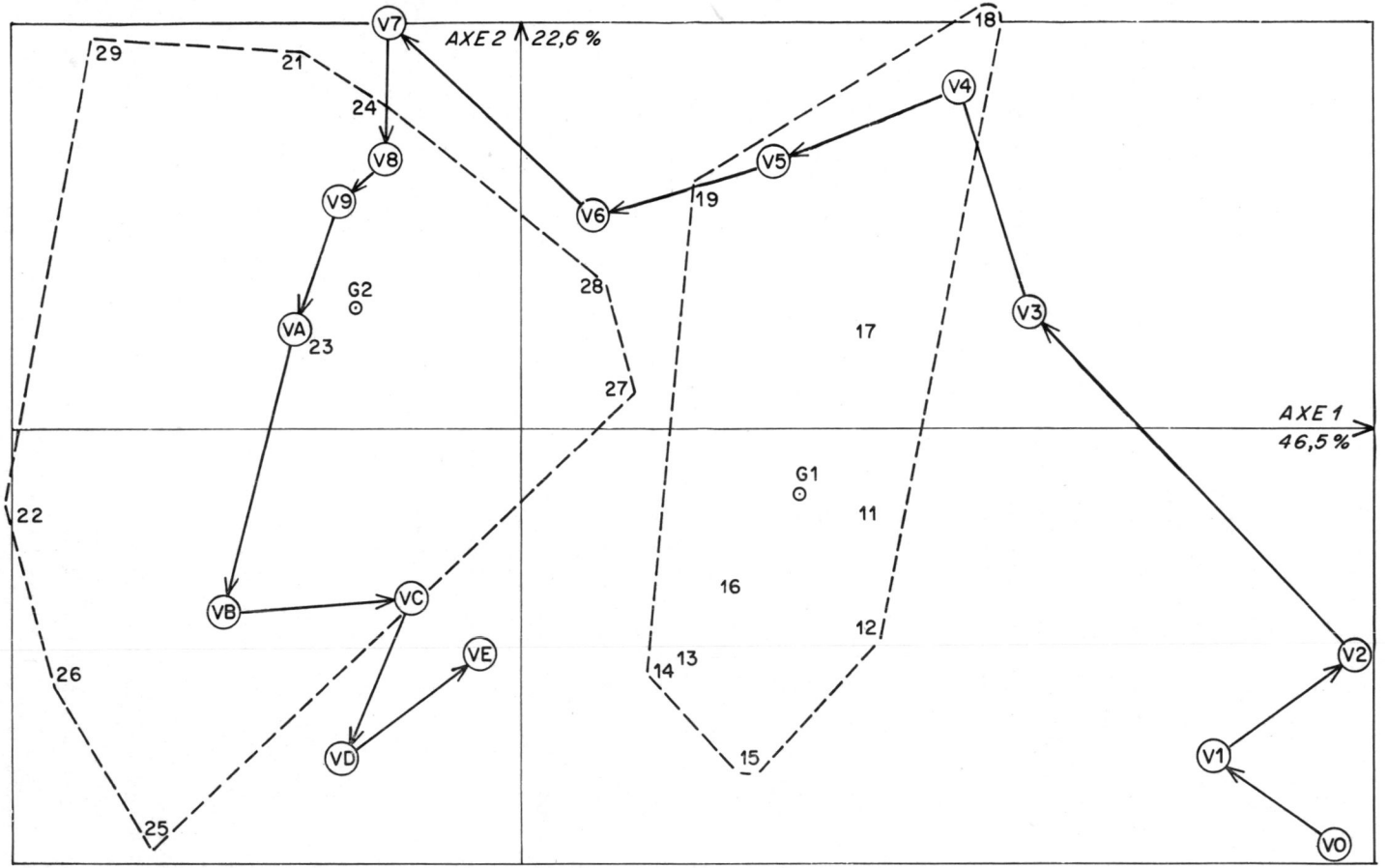


FIG. 4. — *Croissance de l'Aubergine*
Analyse factorielle des correspondances, plan 1-2

V_0 V_1 V_2 ... V_e dates des prélèvements
11, 12 ... 19 allongement des plantes sur balle de paille
21, 22 ... 29 allongement des plantes sur sol

TABLEAU 2

Rendement total commercialisable et type de substrat

Date de récolte	Sol			Balle de paille		
	Rendement (kg/plante)	Poids moyen du fruit (g)	Nombre de fruit par plante	Rendement (kg/plante)	Poids moyen du fruit (g)	Nombre de fruit par plante
1er juin	0,36	127,9	2,8	0,93	127,2	7,3
28 juin	1,24	132,6	9,3	1,28	124,3	10,2
12 août	3,40	122,4	27,7	4,16	125,8	33,0

Le nombre supérieur de fruits pour les plantes élevées sur balle de paille montre que la nouaison s'effectue dans de meilleures conditions sur ce substrat. Ce phénomène est d'ailleurs lié à un moindre développement de l'appareil végétatif surtout celui du limbe et sans doute du système racinaire.

En effet, le poids total du limbe passe de 90 g de matière sèche pour les plantes sur balle de paille à 172 g pour les plantes sur le sol. En pourcentage, cela représente respectivement 20 et 29 p. 100 de la masse totale de matière sèche. D'ailleurs de nombreuses observations ont permis de mettre en évidence une hypertrophie du limbe des plantes qui poussent sous abri au printemps, liée à l'absence de nouaison. L'équilibre qui existe entre la croissance végétative et celle des organes de reproduction peut être déplacé dans un sens ou dans l'autre selon les conditions écologiques.

Une production accrue de fruits (balle de paille) se faisant au dépens des surfaces foliaires, la réduction de celle-ci pénalise la photosynthèse globale, ce qui permet d'expliquer une moindre production de matière sèche.

De même, le système racinaire doit être plus réduit sur balle de paille puisque la concentration en sels mesurée par la conductivité est plus grande dans ce substrat. En effet, nos observations en culture hydroponique ont montré que l'augmentation de la concentration en sels de la solution nutritive provoque une diminution de la masse racinaire. Quand la concentration de la solution passe de 1,62 g/l à 4,86 g/l, le poids sec des racines de la variété *Dourga* diminue de 6,36 g à 3,70 g par plante. POCHARD (1973) a mis en évidence une relation étroite entre les possibilités de nouaison d'une variété d'aubergine au printemps et le développement de son système racinaire. Les variétés originaires de régions septentrionales (le Japon ou la Mandchourie) dont la nouaison est normale en serre ont une croissance racinaire réduite. Tandis que les types originaires de pays secs ou tropicaux qui fructifient mal sous abri possèdent une masse de racines nettement plus importante en volume et en poids.

Précocité.

L'effet des balles de paille sur la précocité apparaît nettement pour le premier cycle de récolte (fig. 5). Ainsi la récolte commence 11 jours avant, sur les plantes mises en place sur les balles de paille. En outre, le rythme de production

croît rapidement dès le début, tandis que sur sol, les premières récoltes sont plus réduites en volume et en poids. Cette observation est extrêmement importante pour le praticien parce que les cours sur les marchés sont souvent au plus haut. Ensuite, les prix baissent rapidement, ce qui diminue la rentabilité de la culture sous serre dont les investissements exigent de lourdes mises de fond.

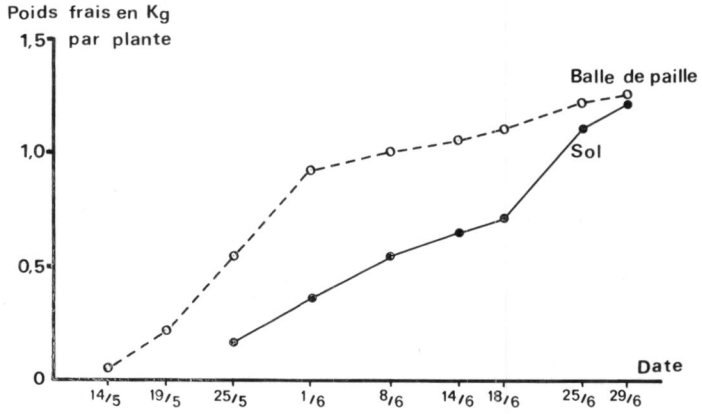


FIG. 5. — *Évolution de la production précoce*

L'accélération du cycle végétatif apparaît rapidement, en partie sous l'effet de la température de la balle de paille. En effet, si la première fleur s'est épanouie en même temps pour tous les traitements aux environs du 5 avril, à partir du deuxième niveau de fleurs, un déclalage apparaît qui s'accentue avec le temps. D'autre part, l'équilibre végétatif différent favorise énormément la production des fruits sur la balle de paille. Le rapport matière sèche fruit/matière sèche totale est égal à 0,22 sur sol et s'élève à 0,40 pour les plantes sur balle de paille.

Nos observations mettent en évidence un antagonisme entre la teneur en nitrates et la concentration en sels totaux, traduite par la valeur de la conductivité de la solution du substrat. En effet, la plupart des travaux montrent qu'un taux élevé d'azote nitrique au niveau des racines conduit à un développement végétatif excessif et pénalise souvent la production de fruits. Ainsi, TODERI (1965) avait déjà noté qu'une forte fumure azotée conduit à une augmentation du volume de la partie végétative et à une diminution de la précocité des récoltes. Mais dans le cas de la balle de paille, la forte teneur en nitrates s'accompagne d'une forte élévation du taux de sels ce qui diminue la pression osmotique. Cet antagonisme nitrate-pression osmotique s'accompagne d'une réduction de la partie végétative de la plante, ce qui contribue à une plus forte récolte relative et parallèlement une précocité accrue.

Caractéristiques de la récolte.

Les critères de récolte des aubergines sont particulièrement imprécis et empiriques puisque nous cueillons des fruits verts. Il est habituellement admis que les meilleurs fruits sont obtenus en effectuant une cueillette précoce avant qu'ils n'atteignent leur taille définitive. Mais ces fruits ont un poids unitaire insuffisant pour obtenir un rendement économique acceptable. Aussi le praticien récolte des

fruits dont le poids est en général supérieur à 100 grammes. Le repère de cueillette apparent et pratique correspond au renflement du fruit au niveau du calice. Parmi les critères technologiques, celui de la matière sèche est particulièrement intéressant du fait de l'emploi de l'Aubergine comme support dans diverses préparations culinaires.

Le tableau 3 donne la composition moyenne des lots de la variété *Baluroi* pour les récoltes au printemps 1971 effectuées sur les deux substrats étudiés.

TABLEAU 3

Composition des fruits d'Aubergine

Traitement	Extrait sec (%)	Acidité libre (meq p. 100)	Sucres totaux (%)	pH	Protides (p. 100 de MS)	Matières minérales (p. 100 MS)			
						P	K	Ca	Mg
Sol	6,5	1,48	2,8	5,5	1,2	0,25	1,6	0,19	0,18
Balle de paille	8,5	2,14	3,0	5,45	1,6	0,24	1,6	0,23	0,21

Les résultats obtenus pour les différents critères analysés permettent de se rendre compte que la composition moyenne du fruit correspond à celle obtenue par d'autres auteurs (AUBERT, 1971 ; MISHRA, 1972).

L'analyse des résultats révèle une influence nette du type de substrat sur certaines caractéristiques du fruit : extrait sec, acidité libre et protides. En particulier, l'analyse factorielle des correspondances a mis en évidence l'influence du substrat « balle de paille » sur l'accumulation des produits de la photosynthèse dans le fruit (fig. 6). L'axe 3 du graphique sépare le fruit des autres organes. Il sépare aussi les mesures de matière sèche sur sol et sur balle de paille. Cette disposition sur le graphique montre que le fruit accumule plus de matière sèche sur balle de paille que sur sol, les autres organes ayant une très légère tendance à faire le contraire. Cette augmentation de la valeur de l'extrait sec est vraisemblablement due à une migration accélérée et plus grande des produits de la photosynthèse vers le fruit. Et parallèlement, la partie végétative ne peut pas utiliser ces réserves pour sa croissance. L'équilibre hydrique entre les différents organes de la plante doit être complètement modifié sous l'action d'un relèvement marqué de la pression osmotique dans la solution de la balle de paille.

De même, l'acidité libre augmente dans les fruits récoltés sur balle de paille, ce qui peut modifier l'appréciation gustative immédiate.

Par contre, les autres caractéristiques ne subissent pas de variation notable selon le substrat. Seuls, les alcalino-terreux (calcium, magnésium) augmentent sensiblement dans les fruits provenant des parcelles balle de paille. Cette modification peut s'expliquer par une accumulation plus importante de pectates dans les parois du fruit. Par contre, les sucres qui conditionnent l'impression gustative (AUBERT, 1971), ne sont pas sensiblement affectés par le substrat.

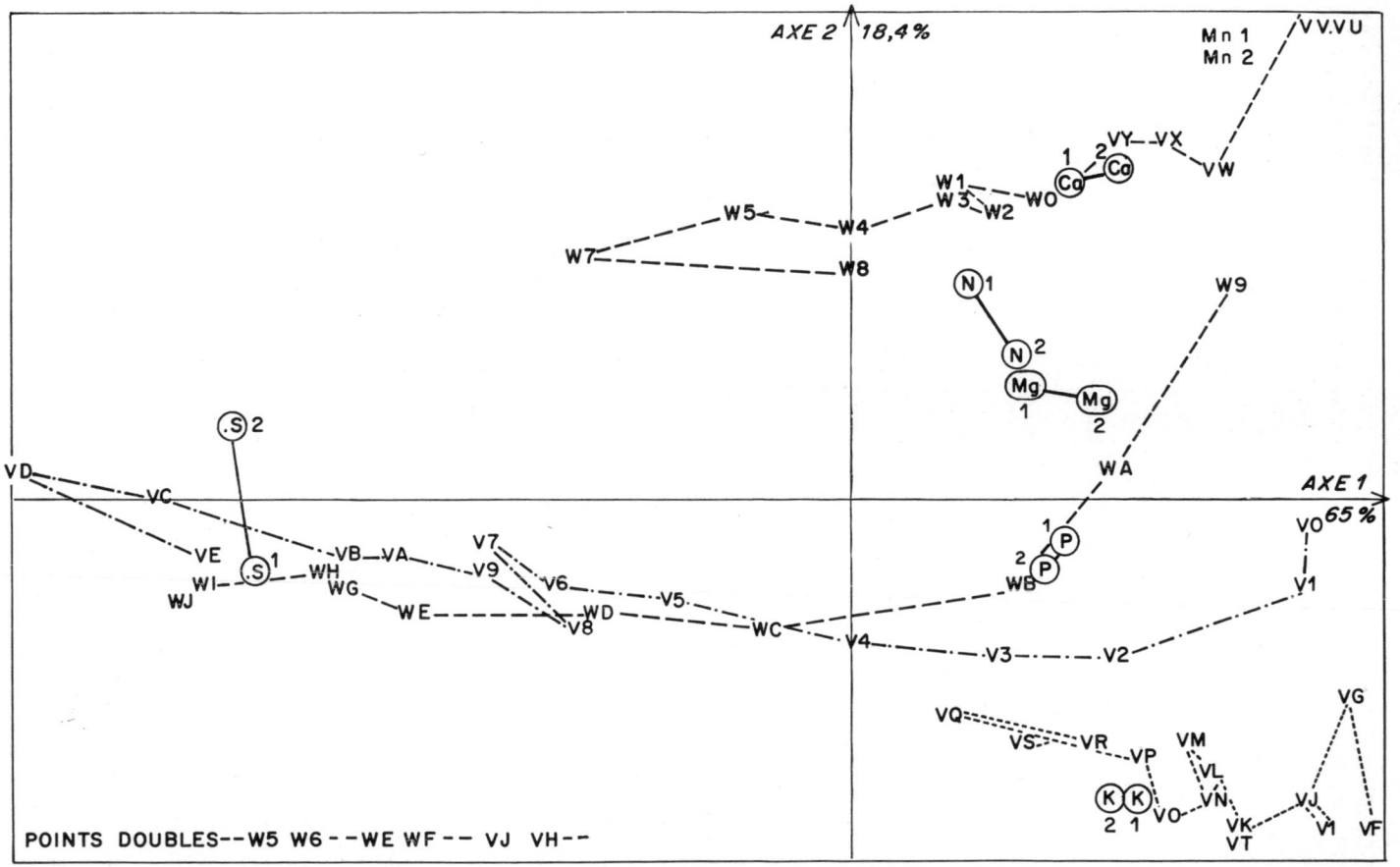

AXE 2 18,4 %
AXE 1 65 %
Mn 1
Mn 2
VV.VU
VY
VX
VW
Ca
Ca
W1
W3
W2
WO
W5
W4
W7
W8
N
N
Mg
Mg
W9
WA
P
P
WB
VO
V1
VD
VC
VE
.S
.S
WI
WJ
WH
WG
VB
VA
WE
V7
V9
V6
V8
WD
V5
WC
V4
V3
V2
VQ
VS
VR
VP
VM
VL
VN
VO
VK
VT
VJ
V1
VG
VF
K
K
POINTS DOUBLES--W5 W6--WE WF-- VJ VH--

FIG. 6

3. — *Nutrition minérale*

La nutrition minérale d'une plante dépend de multiples facteurs édaphiques parmi lesquels la température, la concentration et l'aération de la solution nutritive apparaissent particulièrement importantes. Aussi l'absorption des éléments minéraux varie selon le substrat utilisé par la plante. En effet, la température (28°C environ) et la concentration de la solution (cf. tabl. 1, p. 595) sont plus élevées dans la balle de paille. En outre, la fermentation de la paille provoque une modification très ample de l'équilibre entre l'oxygène et le gaz carbonique dans l'atmosphère du substrat, et une compétition s'établit entre la plante et les micro-organismes aérobies du substrat pour l'utilisation de l'oxygène.

Rythme d'absorption.

Les figures 7 à 11 donnent l'évolution des exportations dans le temps pour les différents éléments majeurs en fonction du type de substrat. Les observations furent

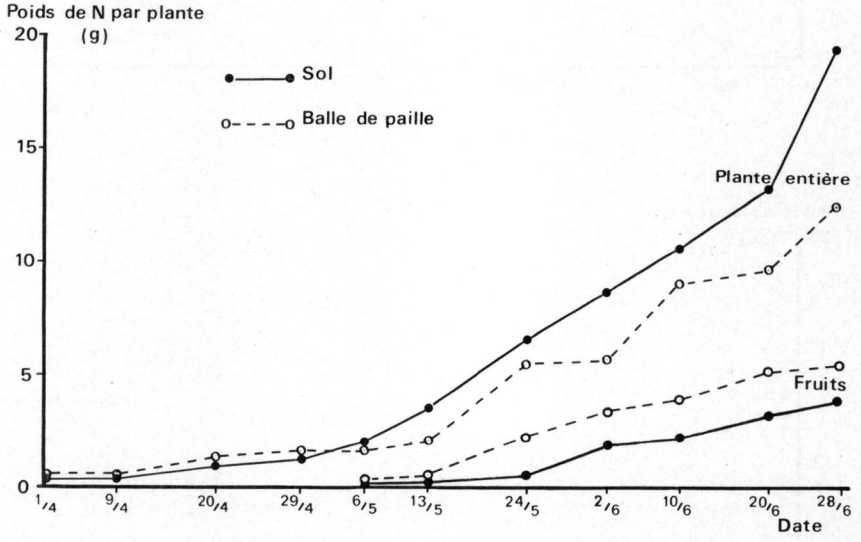


FIG. 7. — *Évolution de l'absorption de l'azote*

FIG. 6. — *Répartition des éléments minéraux dans les organes de la plante*

Légende, A. F. C., plan 1-2

S_1 : Matière sèche (croissance sur balle de paille)
S_2 : Matière sèche (croissance sur sol)

N_1 N_2
P_1 P_2
K_1 K_2
Ca_1 Ca_2
Mg_1 Mg_2
Mn_1 Mn_2

éléments minéraux (balle de paille et sol)

} Lignes du tableau analysé

V_0, V_1 ... V_E : 15 mesures sur tige
V_F, V_G ... V_T : 15 mesures sur pétiole
V_U, V_V ... W_8 : 15 mesures sur limbe
W_9, W_A ... W_J : 11 mesures sur fruits

} colonnes du tableau analysé

arrêtées le 28 juin lorsque le volume démesuré des plantes installées sur le sol nécessita une taille sévère.

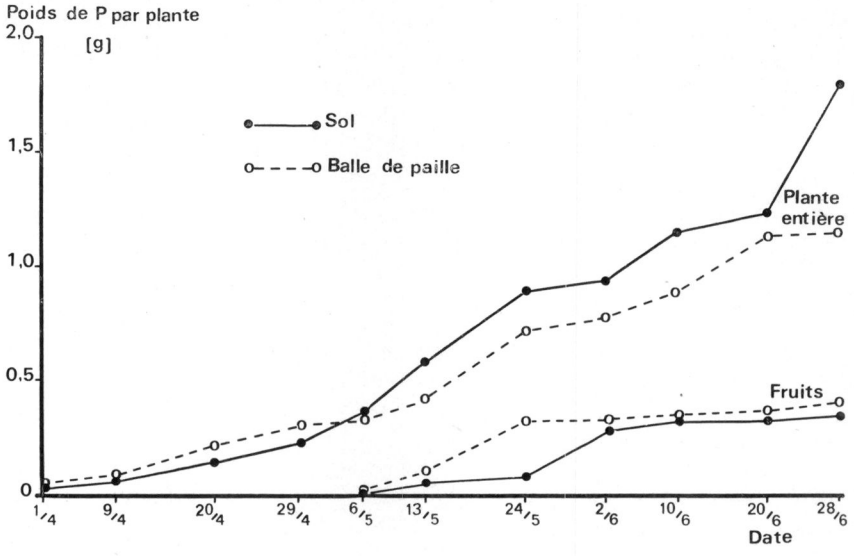


FIG. 8. — *Évolution de l'absorption du phosphore*

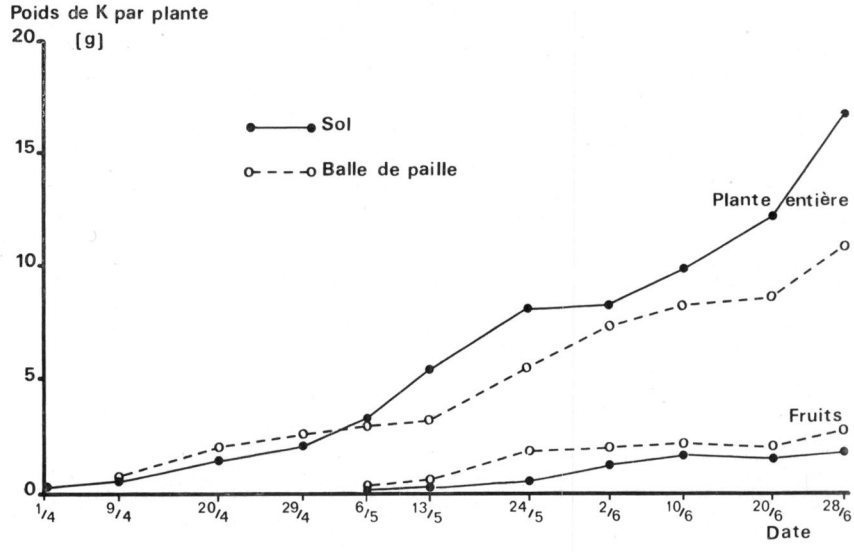


FIG. 9. — *Évolution de l'absorption de potassium*

L'analyse des résultats rapportés par les différents graphiques montre que les prélèvements d'éléments minéraux sont supérieurs, au départ de la végétation, pour les plantes placées sur balle de paille. Mais ensuite, le phénomène s'inverse, généralement après un mois de croissance, et les prélèvements totaux sont toujours plus

grands pour les plantes situées sur le sol. Au début, la température plus élevée favorise la végétation sur les balles de paille et ensuite, la concentration plus forte diminue la consommation en eau, ce qui provoque un ralentissement de la croissance.

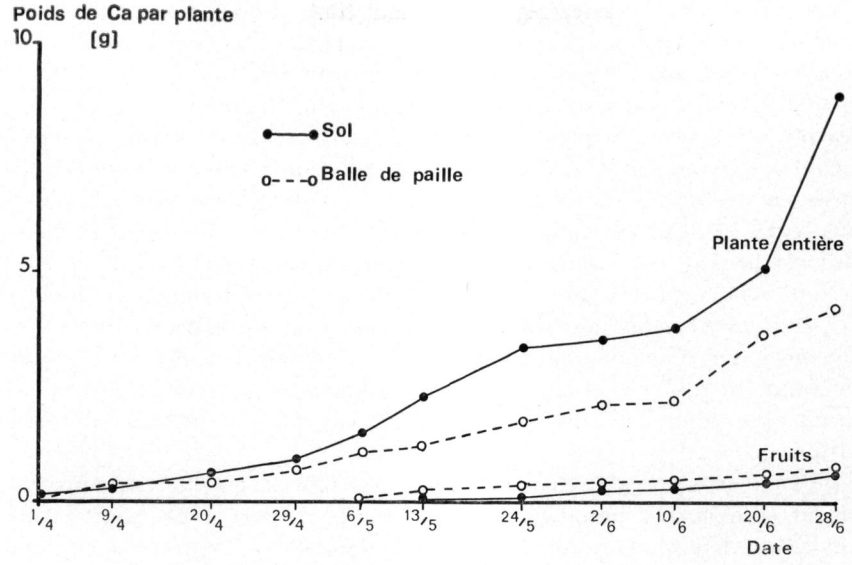


FIG. 10. — *Évolution de l'absorption du calcium*

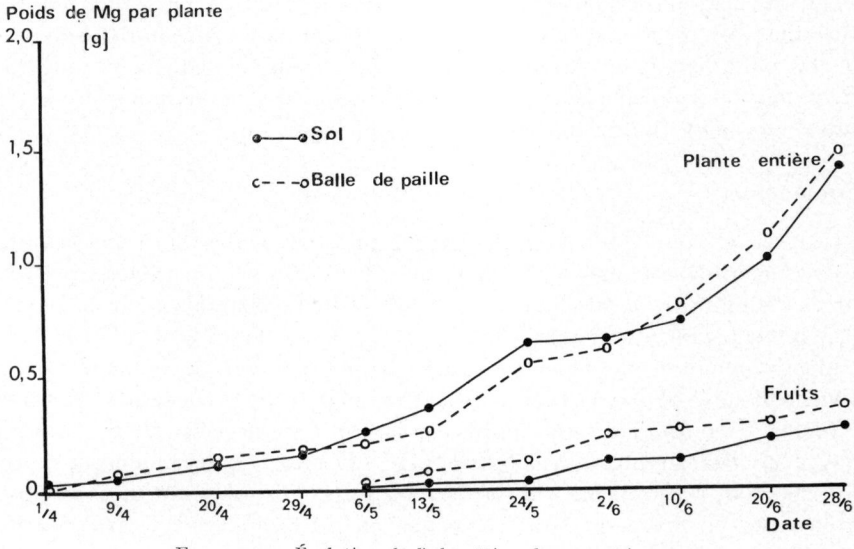


FIG. 11. — *Évolution de l'absorption du magnésium*

Par contre, la quantité d'éléments minéraux présents dans les fruits reste toujours supérieure pour le traitement « balle de paille ». En effet, sur ce substrat, l'accumulation de matière sèche, surtout dans les fruits, est nettement plus importante

pendant toute la période végétative et la composition minérale des tissus est assez voisine.

Ce schéma général ne donne pas une idée précise de l'amplitude du phénomène en fonction de l'élément considéré. Ainsi pour l'azote, le rythme de prélèvements sur balle de paille reste assez régulier pendant toute la saison, avec un changement au moment où les fruits apparaissent sur les plantes. Par contre, pour les plantes conduites sur sol, un deuxième changement apparaît à la fin du mois de juin lorsque l'appareil végétatif aérien devient démesuré. Les fruits accumulent de 40 à 60 p. 100 de l'azote nécessaire à la plante sur balle de paille selon la période d'observation. Par contre, ce pourcentage se maintient à un niveau inférieur à 20 p. 100 du total pour les plantes situées sur sol. Nous retrouvons, dans le cas de l'azote, la plus grande efficience de la culture sur balle de paille pour l'obtention d'une bonne production de fruits avec un appareil assimilateur plus réduit.

Nous notons la même différence pour l'absorption du phosphore et du potassium, mais, pour ces éléments, les fruits ont une importance quantitative moindre, ce qui donne un rythme d'assimilation plus régulier tout au long de la période de végétation. Cette conduite peut s'expliquer par les possibilités de migration de ces éléments qui sont plus réduites puisque la récolte s'effectue avant la maturité physiologique des fruits.

Le comportement des alcalino-terreux (calcium et magnésium) apparaît relativement différent. Comme certains auteurs l'ont déjà noté pour l'Aubergine (KAUFMANN et VORWERK, 1971), d'autres solanacées (CORNILLON, 1974) et pour la plupart des espèces, ces éléments s'accumulent surtout dans la partie végétative. Seul le magnésium prend une certaine importance dans les fruits. Mais pour cet élément, de nombreuses pulvérisations en cours de culture ne permettent pas de se faire une idée précise sur les conditions d'absorption au niveau du système racinaire. De plus, ces pulvérisations ont provoqué un enrichissement marqué de tous les tissus végétaux et il en résulte que l'absorption est très comparable pour les plantes soumises aux deux traitements tout au long de la culture.

Exportations.

Le tableau 4 donne la valeur des exportations par plante ainsi que la contribution de chacun des organes à ces prélèvements. L'analyse du tableau permet une étude de l'équilibre nutritif entre les éléments et une comparaison sur la répartition interne des substances minérales (tabl. 5).

Ainsi, l'équilibre global entre l'azote, le phosphore et le potassium n'est pas sensiblement modifié par le type de substrat, malgré une croissance très différente des plantes. En outre, l'absorption du calcium est amplifiée sur sol en relation peut-être avec la valeur du pH de ce substrat (pH = 7,1) et l'équilibre ionique de la solution de sol. Mais inversement, l'absorption du magnésium apparaît meilleure pour les plantes mises en place sur balle de paille, en relation avec les pulvérisations de sulfate de magnésium.

Par contre, le substrat modifie l'importance relative de la contribution des divers organes de la plante aux exportations globales. Le sol privilégie les prélèvements d'azote et de phosphore par le limbe tandis que la balle de paille favorise ceux effectués par les fruits. Les plantes installées sur sol utilisent environ 50 p. 100 de l'azote

total pour la production de limbe et moins de 20 p. 100 pour les fruits. Par contre, sur balle de paille, 40 p. 100 de l'azote sert pour la production de fruits et 35 p. 100 environ pour le limbe.

TABLEAU 4

Exportation de l'Aubergine.
Contribution des différents organes en fonction du substrat

Traitement	Organe	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
		gramme par plante				
Sol	Tige	3,65	0,30	3,65	1,25	0,40
	Pétiole	1,10	0,15	2,30	0,40	0,10
	Limbe	9,35	0,90	8,25	6,20	0,50
	Ébauche de fruit	1,25	0,10	0,45	0,10	0,10
	Fruit	3,85	0,35	2,10	0,30	0,25
	TOTAL	19,20	1,80	16,75	8,25	1,35
Balle de paille	Tige	1,40	0,10	1,50	0,60	0,30
	Pétiole	0,30	0,15	2,60	0,40	0,10
	Limbe	4,65	0,40	3,60	2,80	0,40
	Ébauche de fruit	0,95	0,10	0,40	0,10	0,10
	Fruit	5,20	0,40	2,80	0,35	0,35
	TOTAL	12,50	1,15	10,90	4,25	1,25

TABLEAU 5

Rapport dans l'absorption des substances nutritives

Traitement	N	P	K	Ca	Mg
Sol	1	0,09	0,87	0,43	0,07
Balle de paille	1	0,09	0,87	0,34	0,10

De même, l'utilisation du potassium par les fruits est augmentée sur les balles de paille tout en restant prépondérante dans le limbe. Par contre, l'absorption du calcium s'effectue selon la même hiérarchie pour les deux substrats avec une prédominance très marquée du limbe qui intervient pour 60 à 70 p. 100 dans la valeur des exportations.

Par rapport à KAUFMANN et VORWERK (1971), nous notons une inversion de l'importance de l'azote et du potassium ; chez ces auteurs, le potassium possède la plus grande importance quantitative dans les exportations de l'Aubergine.

La contribution des divers organes de la plante à l'exportation des éléments minéraux est différente de celle que nous avons observée. En effet, pour ces auteurs, ce sont les fruits qui exportent le plus, contrairement à nos observations qui placent le limbe le plus souvent à la première place pour les deux substrats. Cette différence peut provenir de l'époque et du lieu auxquels sont effectuées les observations. KAUFMANN et VORWERK ont travaillé sur une culture d'été, à une époque où il n'existe aucun problème de croissance en Europe du Nord, tandis que notre travail est réalisé au printemps pendant une période défavorable, même en région méditerranéenne.

Diagnostic.

L'analyse factorielle des correspondances nous a permis de noter l'élément qui caractérise le mieux l'organe considéré de la plante. Les figures 6 et 12 fournissent l'analyse d'un ensemble constitué des 15 dates de mesures successives effectuées à la fois sur la tige, le pétiole et le limbe et des 11 dates du fruit, avec d'autre part les 14 types de mesures prises : 7 mesures : matière sèche, azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse, chacune doublée, concernant la croissance sur sol et sur balle de paille.

Sur la figure 6, le premier axe isole nettement les mesures de matières sèches, des mesures d'éléments minéraux. La disposition des points dates montre aussi une interprétation en facteur « temps ». Cette observation traduit le fait que la matière sèche est à peu près la seule mesure qui croît régulièrement dans le temps. Le deuxième axe sépare les mesures d'éléments minéraux et d'autre part les dates selon l'organe sur lequel est effectuée la mesure. Il décrit la répartition des éléments minéraux dans les différentes parties de la plante : calcium et manganèse sont relativement plus importants dans le limbe et le potassium est lié au pétiole. Les autres éléments, de même que la tige et le fruit, étant assez centraux sur cet axe, on ne peut en tirer une conclusion claire.

La figure 12, dans le plan des axes 2 et 3, montre la séparation des dates de mesure selon les organes, et l'axe 3 sépare nettement le fruit des autres organes. Nous voyons sur le graphique 12 les déterminations d'éléments minéraux qui apparaissent particulièrement typiques pour chaque organe : potassium pour le pétiole, phosphore pour la tige et peut-être le potassium, phosphore et azote pour le fruit et calcium et manganèse pour le limbe avec une tendance pour azote et magnésium.

FIG. 12. — *Répartition des éléments minéraux dans les organes de la plante*
Légende, A. F. C., plan 2-3

S_1 : Matière sèche (croissance sur balle de paille)
S_2 : Matière sèche (croissance sur sol)
N_1 N_2
P_1 P_2
K_1 K_2
Ca_1 Ca_2
Mg_1 Mg_2
Mn_1 Mn_2
éléments minéraux (balle de paille et sol)
} Lignes du tableau analysé

V_0, V_1 ... V_E : 15 mesures sur tige
V_F, V_G ... V_T : 15 mesures sur pétiole
V_U, V_V ... W_8 : 15 mesures sur limbe
W_9, W_A ... W_J : 11 mesures sur fruits
} colonnes du tableau analysé

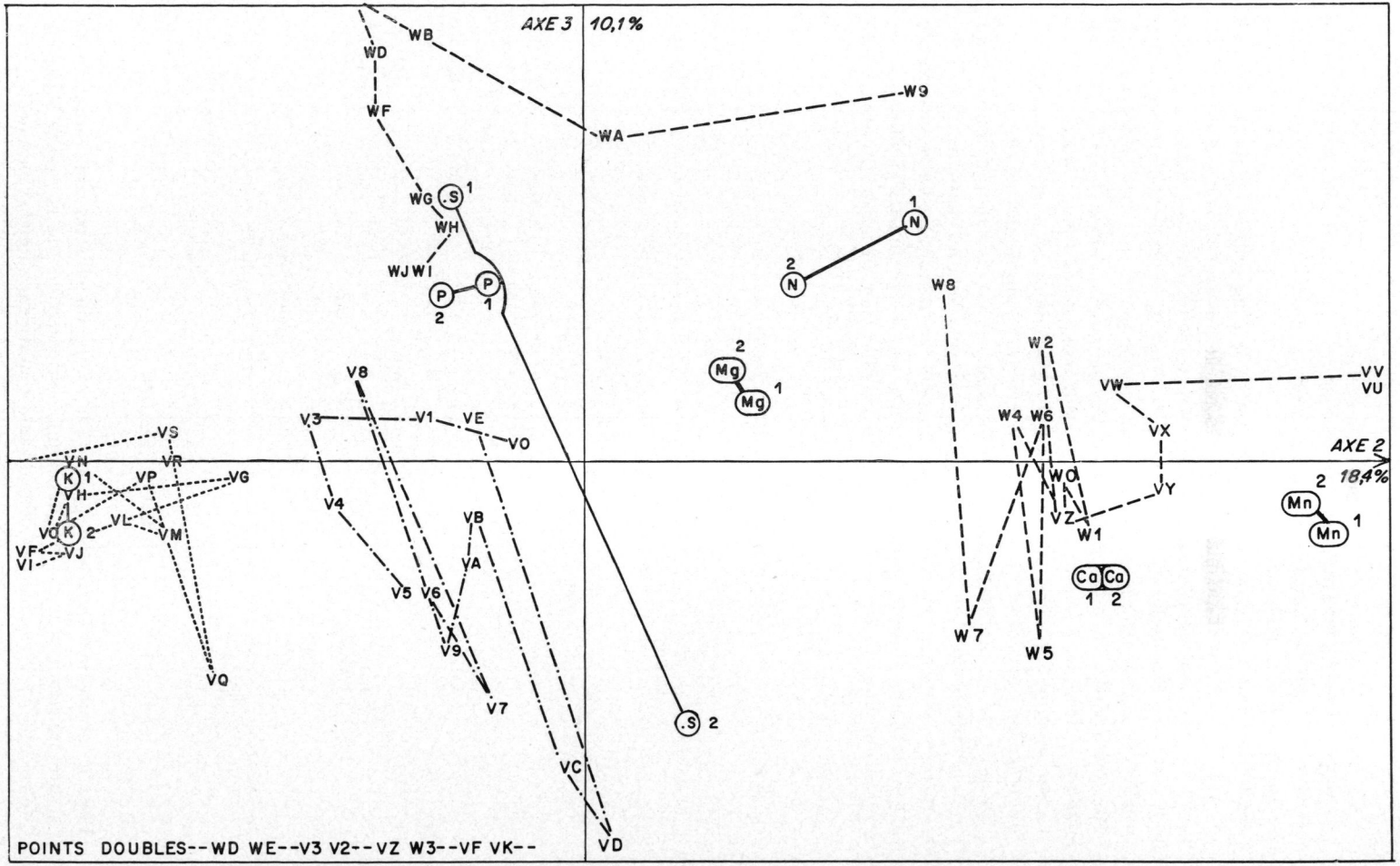

AXE 3 10,1%
AXE 2 18,4%
WB
WD
WF
WA
W9
WG
.S
1
WH
WJ WI
P
P
2
1
N
1
N
2
W8
W2
Mg
2
Mg
1
VW
VV
VU
W4 W6
VX
V8
V3
V1
VE
VO
VS
VN
VR
K
1
VP
VG
VH
VO
K
2
VL
VM
VF
VJ
VI
V4
VB
VA
V5
V6
V9
V7
VQ
WO
VZ
W1
VY
Mn
2
Mn
1
Ca
Ca
1
2
W7
W5
.S
2
VC
VD
POINTS DOUBLES--WD WE--V3 V2--VZ W3--VF VK--

FIG. 12

L'analyse des divers graphiques permet de voir que la feuille, à condition de séparer limbe et pétiole, constitue le meilleur organe pour déceler une carence éventuelle au cours de la croissance.

Le tableau 6 donne, à deux dates différentes, la composition moyenne du limbe et du pétiole provenant de plantes situées sur les deux substrats étudiés. Nous pouvons observer une concentration très différente de chacun des éléments nutritifs dans le limbe et le pétiole, à l'exception du phosphore. En effet, d'après l'analyse factorielle des correspondances, la meilleure discrimination du phosphore ne peut pas être obtenue dans la feuille mais dans la tige ou le fruit. A deux mois d'intervalle, la feuille ne subit que de faibles modifications de composition pour l'azote, le potassium et le calcium. L'analyse factorielle des correspondances n'a pas mis en évidence de différence de concentration marquée pour toute la durée de l'essai.

En outre, la lecture du tableau 6 révèle qu'il n'existe pas de différence significative de composition pour les feuilles (limbe et pétiole) provenant de deux substrats opposés par leurs caractéristiques physiques et chimiques. Cette observation permet de se rendre compte du rôle essentiel joué par les mécanismes cellulaires dans la composition minérale de la plante et en particulier celui de l'absorption racinaire.

TABLEAU 6

Composition de la feuille et type de substrat

Traitement	Organe	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
		gramme p. 100 de matière sèche				
Floraison des premières fleurs, 9 avril						
Sol	Limbe	6,10	0,80	4,50	3,47	0,65
	Pétiole	3,10	0,76	9,00	1,84	0,51
Balle de paille	Limbe	6,80	0,91	5,40	2,70	0,54
	Pétiole	3,90	0,80	10,60	1,50	0,40
Récolte des fruits, 7 juin						
Sol	Limbe	6,10	0,56	4,90	3,50	0,40
	Pétiole	3,67	0,61	9,50	1,16	0,27
Balle de paille	Limbe	6,25	0,42	4,2	3,20	0,45
	Pétiole	3,33	0,42	8,3	1,35	0,37

CONCLUSION

Pour la culture de l'Aubergine sous abri, la nature du substrat apparaît décisive pour assurer une croissance et un développement accélérés de la plante. Aussi, le choix de ce support devient-il très délicat pour le praticien auquel se posent de nom-

breux problèmes de pathologie et de nutrition de la plante. Dans le cas de l'Aubergine, l'action se complique par l'apparition d'une mauvaise nouaison qui provoque la chute des fleurs.

L'étude que nous avons réalisée en serre dans des conditions très proches de la pratique, permet d'effectuer de nombreuses observations sur les réactions du végétal à deux types de substrats très différenciés : le sol et la balle de paille.

L'utilisation de la balle de paille comme substrat pour la culture de l'Aubergine sous serre au printemps, apporte plusieurs avantages sans présenter apparemment d'inconvénients.

Ainsi la lutte contre la verticilliose est facile dans les sols de serre très fortement contaminés. On peut isoler les balles de paille en interposant une feuille de plastique sur le sol.

La balle de paille favorise la fructification au printemps tout en réduisant la partie végétative de la plante et surtout le limbe des feuilles. Ce nouvel équilibre est très intéressant puisque, habituellement, à cette période de l'année, les plantes fabriquent des feuilles hypertrophiées mais ne donnent pas de fruit. Ces observations peuvent s'expliquer par des modifications, parfois profondes, de certaines caractéristiques du substrat : la température, la concentration saline et la composition de l'atmosphère au niveau des racines des plantes situées sur balle de paille.

Parallèlement, la précocité de la récolte et l'extrait sec des fruits augmentent dans de fortes proportions. Le gain de temps sur le début de récolte atteint environ 10 jours et le rythme de récolte est plus élevé. L'augmentation de la valeur de l'extrait sec du fruit peut être lié à une nutrition hydrique différente ou à un transfert préférentiel des produits de la photosynthèse vers cet organe. Cette modification est particulièrement valable du point de vue technologique quand l'Aubergine sert de support pour les préparations culinaires.

La nutrition minérale est aussi nettement modifiée par la nature du substrat. En effet, les besoins globaux en éléments nutritifs diminuent fortement puisque les exportations sont réduites d'un tiers pour l'azote, le phosphore et le potassium. Et malgré cette économie d'éléments nutritifs, la production du fruit reste nettement supérieure sur balle de paille. La répartition interne des éléments minéraux subit aussi des modifications. L'azote et le phosphore se retrouvent surtout dans le limbe pour les plantes installées sur le sol tandis qu'ils migrent surtout dans le fruit pour les plantes situées sur balle de paille. Cependant sur le plan global, il n'apparaît pas de modification dans l'équilibre minéral de la plante surtout en ce qui concerne azote, phosphore et potassim.

L'analyse factorielle des correspondances a permis de préciser que la feuille (limbe et pétiole) constitue le meilleur organe pour le diagnostic. En effet, tous les éléments minéraux, à l'exception du phosphore, apparaissent typiques et *importants* pour la feuille.

Ces résultats particulièrement nets de l'action de la balle de paille sur la croissance et le développement de l'Aubergine soulèvent de nouveaux problèmes. En particulier, l'étude de la concentration de la solution nutritive doit préciser les relations qui existent entre la croissance, l'état hydrique de la plante et la fructification.

Reçu pour publication en octobre 1975.

SUMMARY

THE EGG-PLANT (*SOLANUM MELONGENA* L.). INFLUENCE OF THE NATURE OF THE SUBSTRATE ON THE PLANT BEHAVIOUR

The study of egg-plant undertaken in greenhouses revealed the influence of the substrate, soil or bales of straw, on plant growth and development. Indeed the use of bales of straw induces a deep modification of the ratio of the fruit to the vegetative part by improving the conditions of fruit formation and reducing the importance of the leaves. For a higher fruit production on bales of straw, plant requirements in mineral elements are greatly decreased. Moreover the straw contributes to the accumulation of dry matter in the fruit and thus yields a vegetable more interesting from a technological point of view ; the factorial analysis of correspondences allows to set up a close relation between the nutritive elements and the organ, which makes the diagnosis easier for the agronomist.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE EIERPFLANZE (*SOLANUM MELONGENA* L.). EINFLUSS VOM SUBSTRATSTYP AUF DAS PFLANZENVERHALTEN

Die im Gewächshaus untergenommene Untersuchung von Eierpflanzen lässt den Einfluss des Substrats (Boden oder Strohballen) auf die Pflanzenwachstum und-entwicklung erkennen. Der Verbrauch von Strohballen erzeugt eine tiefe Änderung des Verhältnisses zwischen dem Frucht und dem vegetativen Teil indem er die Fruchtansatzbedingungen verbessert und die Blattrolle vermindert. Das heisst dass für eine grössere Fruchtproduktion auf Strohballen die Nachfrage nach Nährelementen verringert ist. Strohballen begünstigen die Verlagerung von Trockensubstanz in die Früchte und liefern ein aus dem technologischen Aspekt mehr befriedigende Gemüse. Daneben erlaubt die kactorielle Analyse der Korrespondenzen eine enge Beziehung zwischen dem Nährelement und dem Organ zu finden, was die Diagnose für den Agronom erleichtert.

РЕЗЮМЕ

Баклажан (Solanum melongena L.). — Влияние природы субстрата на поведение растений.

П. КОРНИЙОН, Ж. П. ЛЕЙ.

Изучение, проведенное на тепличных баклажанах, позволило выявить влияние субстрата, почвы, или раскрошенной соломы, на рост и развитие растений. Так, например, применение раскрошенной соломы, вызывало сильное изменение соотношения плод/вегетативные части, благодаря улучшению условий завязывания узлов и уменьшению размеров листов. Таким образом, на соломе, при лучшей продукции плодов, достигается сильное уменьшение нужд растений в минеральных элементах питания. Раскрошенная солома, параллельно, фаворизирует накопление сухого вещества в плодах, вызывая таким образом образование более интересного с технологической точки зрения, баклажана. А факториальный анализ соответствий, позволил кроме того установить, существование тесной связи между питательным элементом и органом, что облегчает возможности диагноза для агронома.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.O.A.C., 1970. *Official methods of analysis* (370, 376, 11e ed. Horwitz, Washington D. C.).

AUBERT S., 1971. L'Aubergine (*Solanum melongena* L.). I. Composition et facteurs de qualité. *Ann. Technol. agric.*, **20**, 3, 241-264.

C.I.I., 1973. Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux. *Oléagineux*, **2**, 87-92.

C.N.C.E., 1971. *L'évolution de la production fruitière et légumière sous serres en Europe.* **12** , 30.

CORNILLON P., 1974. Croissance et développement du Piment doux sous serre. Besoins et éléments minéraux. *Pépiniéristes, Hortic., Maraîchers*, **148**, 47-51.

KAUFMANN H. G., VORWERK R., 1971. Zur Nährstoffanfnahme von Gemüsepaprika (*Capsicum annuum* L.) und aubergine (*Solanum melongena* L.) beim anban unter glas und plastwerkstoffen. *Arch. Gartenbau.* Bd. **19**, H.1, 7-27.

LEBART L., FÉNELON J. P., 1973. *Statistique et informatique appliquée.* 222-252, 2e ed., Dunod, Paris.

LENZ F., 1970. Einfluss der fruchte auf das wachstum, den wasserverbranch und die nährstoffaufnahme von auberginen (*Solanum melongena* L. var. Lange Violette). *Gartenbauwissen schaften*, **35**, 17, 25-35.

MISHRA G. M., 1966. Preliminary chemical studies in four varieties of Brinjal (*Solanum melongena* L.) and their F. hybrides. *Sci. and cult.*, **32**, 11, 545-546.

MUSARD M., WACQUANT C., THICOIPE J. P., 1972. Production de l'Aubergine en serre. *Compte rendu des essais*, 1971, *I.N.V.U.F.L.E.C.*

POCHARD E., 1973. Sélection de l'Aubergine pour la culture en serre. Mise en évidence de différences variétales liées à l'état hydrique des plantes. *Cultures légumières sous abris dans les régions méditerranéennes.* S.I.S.H., Barcelone-Avignon.

POCHARD E., SERIEYS H., 1974. Mise en évidence de différences variétales de transpiration chez l'Aubergine et d'autres solanacées (*Solanum melongena* L., *Capsicum annuum* L., *Lycopersicum esculentum* MILL.). Conséquences pour l'adaptation à différents climats. *Ann. Amél. Plant.*, **24**, (3), 243-268.

POCHARD E., CORNILLON P., 1975. Influence de l'état hydrique des plantes sur la croissance et la fructification du Piment et de l'Aubergine en serre (à paraître).

TODERI G., 1965. Ricerche sulla concimazione minerale della melanzana (*Solanum melongena* L.). *Riv. Ortoflorofruttic. Ital.*, **69**, 387-400.

X, 1970. Straw substrates for the production of crops in greenhouses. *Minist. Agric. fish. London*, Short term, **105**.

Ann. agron., 1975, **26** (5), 617-623.

CHRONIQUE DES LIVRES

HESS (D.). — PLANT PHYSIOLOGY. — MOLECULAR BIOCHEMICAL AND PHYSIOLOGICAL FUNDAMENTALS OF METABOLISM AND DEVELOPMENT. — Berlin, Springer Verlag Ed., 1975, 333 p.

Ce petit livre est remarquable. Il fait en 300 pages, un tour complet de la physiologie végétale. La publicité sur la couverture le destine aux étudiants et aux professeurs de l'enseignement secondaire. Tous les chercheurs de l'I.N.R.A. qui manipulent les plantes depuis une dizaine d'années ou plus y apprécieront l'abord moderne et condensé des problèmes actuels du métabolisme et du développement, traités avec une égale importance. Contrairement à l'enseignement traditionnel qui oblige à compléter un cours de physiologie par un traité de biochimie et un livre de biologie moléculaire, l'auteur aborde la physiologie végétale par les acides nucléiques, l'information génétique, la transcription et la translation ; il traite de la photosynthèse puis des sucres, de l'oxydation biologique, des matières grasses, des terpénoïdes, des phénols, des acides aminés, des alcaloïdes, des porphyrines ; la constitution chimique de ces métabolites est soigneusement décrite ainsi que leur biosynthèse. Le développement : croissance et différenciation, fait l'objet de la 2e partie du livre : la division cellulaire, la différenciation due à l'activité différentielle des gènes, la régulation, la polarité et la division cellulaire inégale dans la différenciation, l'élongation cellulaire, la formation de graines et de fruits, la germination, la formation de fleurs et le système vasculaire.

Par ses illustrations et sa clarté, ce livre semble destiné à un excellent « recyclage ».

M.-E. D.

GUENZI (W. D.) *et al.* — PESTICIDES IN SOIL AND WATER. — Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin U. S. A., 1974, 562 p.

Quel que soit leur mode d'application, tous les pesticides utilisés en Agriculture parviennent immédiatement ou à terme au sol puis dans les eaux ; le sol se comporte comme un filtre actif et sélectif agissant sur le devenir de ces produits.

Dans les 16 chapitres de cet important ouvrage, W. D. GUENZI ainsi que 22 autres chercheurs, font le point sur les divers aspects du comportement des pesticides dans le sol et dans l'eau.

Successivement sont abordés les phénomènes :

- d'adsorption par les argiles puis par la matière organique,
- de migration verticale, d'entraînement par les eaux de surface, et de volatilisation,
- de dégradation (d'origine biologique ou non) puis de persistance,
- d'absorption par les plantes,
- d'action sur les microorganismes telluriques et aquatiques.

Sont également examinés les problèmes liés :

- à l'activité biologique des pesticides adsorbés,
- à l'action des pesticides sur les invertébrés telluriques et aquatiques non visés lors des traitements,
- aux résidus des pesticides dans le sol et l'eau,
- à l'extraction et aux dosages des pesticides dans le sol, les sédiments et l'eau.

La plupart des chapitres possèdent une abondante bibliographie, tout particulièrement ceux traitant de la dégradation et du dosage des pesticides, et si deux d'entre eux seulement ont un résumé, l'accès de cet ouvrage est néanmoins facilité par un index.

P. J.

BUDYKO (M. I.). — CLIMATE AND LIFE. — Édition anglaise publiée sous la direction de D. H. MILLER. International Geophysics Series, vol. 18, New York, Academic Press ed. 1974, 520 p.

Cette monographie, traduction anglaise de la version originale russe (1971), se présente comme une récapitulation des travaux de ces 30 dernières années à l'observatoire de Géophysique Voeikov de Leningrad (GGO).

L'ouvrage, qui fait autorité internationale, porte sur l'étude des processus énergétiques liés aux transformations de l'énergie solaire à la surface de la terre et dans l'atmosphère.

L'auteur expose ses recherches sur le bilan masse-énergie et explore les implications de ce concept, apparemment simple, de bilan dans les domaines de climatologie, hydrologie, océanographie, géographie physique.

Les analyses de M. I. BUDYKO offrent de nouvelles perspectives reliant l'activité des organismes vivants aux conditions climatiques, qu'elles soient appliquées à la production photosynthétique de la végétation terrestre, aux bilans thermiques de l'Homme et d'autres organismes, animaux, ou à des problèmes globaux ; en particulier celui des changements climatiques, de l'évolution de la faune et de l'influence de l'Homme sur le climat. Le point culminant de ce livre correspond au chapitre établissant les relations entre les phénomènes biologiques de petite échelle et ceux géophysiques de grande échelle. Il fallait pour cela avoir une compréhension très sûre des processus opérant à ces deux dimensions.

Le contenu de l'ouvrage se divise en plusieurs chapitres :

I. Transformation de l'énergie solaire à la surface de la terre.
II. Méthodes de détermination des composants du bilan thermique.
III. Régimes et distributions géographiques des flux d'énergie à l'échelle du globe.
IV. Modifications de la calotte glaciaire des pôles. Causes et effets climatiques.
V. Variations climatiques dans le passé et contemporaines.
VI. Facteurs climatiques par zones géographiques.
VII. Régime thermique des organismes vivants : plantes, animaux, Homme.
VIII. Facteurs climatiques influant sur la photosynthèse.
IX. Changements successifs de la faune. Étude particulière de la fin du Pléistocène.
X. L'impact de l'Homme sur le climat. Prévisions pour l'avenir.

L'audience de cet ouvrage est largement ouverte aux scientifiques spécialistes des problèmes de l'environnement, biologistes, écologistes, micrométéorologistes et constitue un manuel de base pour les étudiants en météorologie, climatologie et géographie.

M.-C. D.

GATES (D. M.). — PERSPECTIVES OF BIOPHYSICAL ECOLOGY. — Collection « Ecological Studies », Vol. 12, Berlin, Springer-Verlag Ed., 1975, 610 p.

Ce 12e volume de la collection « Ecological Studies » reprend les publications présentées au Symposium d'Écologie biophysique, à la Station de Biologie de l'Université du Michigan, à Douglas Lake, du 20 au 24 août 1973.

En écologie, il est important de comprendre comment les plantes et les animaux s'adaptent à leur environnement, comment ils entrent en compétition pour des facteurs d'environnement variés et comment ils régularisent leur productivité et leur croissance.

Dans cette perspective, l'ouvrage, très spécialisé et de haut niveau, présente une étude de modèles analytiques de base, la première partie concernant la productivité primaire des plantes et la deuxième partie la régulation thermique chez les animaux.

Le but de ces études n'est pas d'obtenir une simple description qualitative des causes et des effets, mais un système de relations quantitatif précis entre le résultat final et les facteurs causaux.

Ces études portent essentiellement sur les échanges de masse et d'énergie : photosynthèse et régulation hydrique sous différentes conditions climatiques pour les plantes, régulation thermique pour différentes espèces chez les animaux (mammifères, oiseaux, reptiles).

Les résultats et les méthodes de bioclimatologie de chaque étude sont discutés.

Plan de l'ouvrage :

I. Modèles analytiques de plantes.
II. Climat extrême et productivité végétale.
III. Mouvements de l'eau et contrôle de sa diffusion par l'environnement.
IV. Modèles théoriques chez les animaux.
V. Observation de la température corporelle animale.
VI. Études du transfert d'énergie chez les animaux.
VII. Index matières.

Le rapporteur de ce symposium, D. M. GATES, conclut en constatant l'importance des modèles en complément des recherches expérimentales, surtout dans un domaine aussi complexe et étendu que celui des systèmes écologiques.

Cet ouvrage est donc destiné à la catégorie de chercheurs spécialisés en écologie, biophysique, bioclimatologie. Sa présentation en est excellente, comme celle de tous les ouvrages de la collection qui l'ont précédé.

M.-C. D.

GIRARD (C. M.), GIRARD (M. C.). — APPLICATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION À L'ÉTUDE DE LA BIOSPHÈRE. — Collection « Sciences Agronomiques », Paris, Masson éd., 1975, 200 p.

Cet ouvrage se propose de faire le point des diverses recherches en Télédétection, tant sur le plan français qu'international. Depuis ces dernières années, les progrès de la Télédétection se sont développés à un rythme exceptionnellement rapide, grâce à la mise au point de nombreux capteurs pour enregistrements multispectraux, photographies dans le visible et le proche infrarouge, thermographies, enregistrements dans les micro-ondes, embarqués sur de nouvelles plates-formes : avions supersoniques, ballons stratosphériques, satellites. Les premiers résultats obtenus, d'un type original de par leur échelle, permettent une interprétation pour laquelle une nouvelle méthodologie, basée sur de solides connaissances en Physique et en Informatique, s'élabore actuellement.

L'originalité de ce livre est de replacer la Photographie aérienne au sein des autres techniques de Télédétection et en ne considérant le visible que comme une partie très intéressante du spectre électromagnétique, mais non comme la seule bande utilisable.

Les auteurs, ingénieurs agronomes enseignants à l'Institut National Agronomique (Paris-Grignon) ont particulièrement choisi leurs exemples dans l'étude de la biosphère, de la vie des plantes et des structures agraires (cultures, travaux culturaux, occupation du sol, parcellaire), les applications présentées résultant largement de leur expérience personnelle. Ces exemples, intentionnellement pris dans les milieux où coexistent plusieurs facteurs, sont analysés avec le souci de montrer les mécanismes de l'interprétation des documents.

L'ouvrage se divise en quatre parties principales. La première partie donne l'information de base concernant la collecte et le traitement des données en fonction des différents domaines spectraux. Le reste de l'ouvrage est consacré aux méthodes d'interprétation des documents. Divers exemples sont analysés dans trois spécialités : l'Agronomie, la Pédologie et l'étude de la végétation et des structures agraires.

Plan de l'ouvrage :

I. La Télédétection :
   — compréhension des phénomènes ;
   — les capteurs ;
   — le traitement des données ;
   — les domaines d'utilisation des données.

II. Les méthodologies :
   — photo-interprétations ;
   — interprétation des images.

III. Les interprétations :
   — la végétation ;
   — la pédologie ;
   — l'agronomie ;
   — l'influence humaine.

IV. Exemples de traitement des données de l'interprétation : les images à haute altitude : photographies prises à partir de ballons.

V. Bibliographie et index alphabétique.

Cet ouvrage s'adresse non seulement aux personnes travaillant dans les spécialités étudiées, mais aussi à tout lecteur s'intéressant aux méthodes de raisonnement, et de ce fait, aux étudiants en Écologie, Agronomie et Géographie ; aux techniciens de l'aménagement du territoire, ingénieurs du génie rural ou civil, géomètres ; et même aux économistes, sociologues... ; donc à tous ceux qui ont à connaître le milieu naturel et ses méthodes d'études, que ce soit à des fins pédagogiques ou pour des projets de développement et d'utilisation des terres.

M.-C. D.

WALTER (H.), HARNICKELL (E.), MUELLER-DOMBOIS (D.). — CLIMATE-DIAGRAM MAPS OF THE INDIVIDUAL CONTINENTS AND THE ECOLOGICAL CLIMATIC REGIONS OF THE EARTH. — Supplement to the Vegetation Monographs. Springer-Verlag Ed., Berlin, 1975, 9 cartes et texte 36 p.

Cet ouvrage présente un atlas des principales zones climatiques mondiales, analysées à partir des climadiagrammes.

Le texte d'introduction à l'utilisation des cartes (36 p.) expose d'abord le principe du climadiagramme et de son utilisation à la caractérisation des climats. Cette première partie est suivie d'une analyse climatique de chacun des continents, basée sur l'interprétation des cartes (1 à 8), Amérique du Nord, Amérique du Sud, Afrique, Australie et Nouvelle-Guinée, Asie du Sud, Asie du Nord, Centre et Est, Europe, Océanie. Le dernier chapitre concerne la classification écologique et le code utilisé pour les variantes au sein des grands types de climat (carte 9).

Les cartes sont de bonne présentation et agréables à consulter. Les cartes 1 à 8 montrent les continents où sont reportés les climadiagrammes, dessinés au site même des stations météorologiques exploitées. Cette présentation synthétique est originale, commode, mais nécessairement limitée. Le complément sera trouvé dans le volumineux atlas *Klimadiagram Weltatlas* de WALTER et LIETH (1967) pour une recherche plus détaillée (8 000 sites).

La carte 9 représente la classification écologique à l'échelle mondiale, avec les zones climatiques principales, leurs variantes et les zones de transition.

Les critères de rapidité d'accès et de facilité de lecture et de compréhension sont pleinement remplis.

L. D.

GIBLIN (R.). — TRANSMISSION DE LA CHALEUR PAR CONVECTION NATURELLE. — Paris, Eyrolles, Collection de l'A. N. R. T., Cahier 2, 1974, 218 p.

Cet ouvrage est le troisième d'une série entreprise par l'Association Nationale de la Recherche Technique (A.N.R.T.) et la Société Française des Thermiciens (S.F.T.), les deux premiers étant « Transmission de la chaleur par rayonnement » de A. GOUFFE (épuisé) et « Transmission de la chaleur par convection dans les tubes » de R. MARCHAL. Parmi les suivants à paraître, un ouvrage sur la convection extérieure et un autre sur la conduction et la thermocinétique sont en préparation.

La convection naturelle est un mode de transmission de la chaleur extrêmement fréquent, se produisant spontanément au contact d'un solide et d'un fluide portés à des températures différentes. Les lois très complexes caractérisant ces échanges sont fonction des surfaces (forme, dimensions), de l'écart de température, des caractéristiques propres au fluide et de son régime d'écoulement, laminaire, turbulent ou transitoire. De nombreuses formules pratiques existent et cet ouvrage en propose une revue documentaire très complète d'utilisation généralisable dans tous les systèmes d'unités cohérents, la plupart des formules étant systématiquement présentées avec des paramètres sans dimension.

Après un rappel de notions générales sur la convection et les nombres caractéristiques, ce fascicule traite de la convection thermique naturelle en régime permanent :

— sur des surfaces simples : plans, cylindres, sphères ;
— dans les espaces confinés : couches planes, cylindriques, sphériques, intérieurs des tuyaux verticaux ouverts ;
— dans les structures à ailettes ;

deux chapitres séparés traitant ensuite le régime transitoire et le cas particulier des métaux liquides.

De courtes annexes utiles donnent les rappels de systèmes d'unités SI, les facteurs de conversion et de plus une bibliographie de base des divers documents de données numériques sur les caractéristiques des fluides.

Une bibliographie par chapitre clôt l'ouvrage.

Le présent cahier ne constitue pas un simple formulaire assorti des règles d'application ; bien plus, l'auteur a eu le souci d'une présentation ouverte à l'appréciation critique du lecteur.

L. D.

ROBERTS (E. C.). — AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY AND CROP SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. — Proceeding of the Second international turfgrass research conference. Blackburg, Virginia, June 19-21, 1973., ed. 1974, 602 p.

Cette publication contient plus de 80 communications présentées au cours de la deuxième conférence internationale sur les gazons. Cette réunion qui a rassemblé près de 250 participants de 15 pays différents, a permis d'aborder les thèmes suivants :

— amélioration génétique des gazons et évaluation de cultivars,
— nutrition et engrais,
— les gazons et l'environnement,
— les sols à gazon et leurs modifications,
— les maladies,
— les mauvaises herbes et insectes,
— la culture du gazon,
— les bords de route.

Cet ouvrage se termine par un index unique contenant les noms d'auteurs ou de centres de recherche ainsi que ceux des plantes, des produits et certains termes de génétique, physiologie, agronomie utilisés au cours de ces communications.

A. R.

NAHAL (I.). — PRINCIPES DE CONSERVATION DU SOL. — Masson, 1975, 144 p., 40 fig., 25 tableaux.

L'auteur indique le chemin à suivre pour l'étude de la détérioration des sols agricoles aussi bien que des sols forestiers et pastoraux. Il propose aussi les différents moyens que peut utiliser, dans la pratique, l'Agriculteur et le Forestier pour empêcher la dégradation de leurs sols, et même pour améliorer ces sols en vue d'augmenter leur production tout en prenant soin de maintenir leur fertilité.

La conservation de l'eau, facteur de production de première importance, en particulier dans les zones affectées par l'aridité, n'est pas négligée ; en effet, l'auteur l'intègre avec celle du sol dans un plan d'aménagement intégral Sol-Eau.

Descendant au niveau de l'exploitation agricole, il souligne au dernier chapitre, la nécessité de l'établissement d'un plan de conservation du sol sur la ferme elle-même et de la mise au point d'une politique de « l'Économie de l'eau », tout en présentant les méthodes d'amélioration de certains terres présentant de grands défauts : drainage, lutte contre l'acidité et la salinité.

Enfin, un chapitre spécial est consacré à la protection des sols de pente, dans lequel l'auteur expose les méthodes modernes, déjà en application dans certains pays et pouvant être utilisées, selon le cas qui se présente à l'exploitant, pour la conservation des sols de pente : travaux le long des courbes de niveau, cultures en bandes alternantes, construction des terrasses.

L'ouvrage se termine par un lexique et une bibliographie très détaillée.

Cet ouvrage est destiné à tous ceux qui s'intéressent à l'exploitation du sol et sera très utile aux exploitants agricoles et forestiers, Ingénieurs agronomes et forestiers, spécialistes de l'aménagement du territoire et de la mise en valeur des terres, experts et conseillers agricoles et forestiers, expérimentateurs, enseignants et étudiants en sciences agronomiques, forestières et pastorales, écologues généralistes, etc.

Grandes divisions de l'ouvrage.

1) La végétation en tant que moyen de conservation du sol.
2) Les pratiques culturales en tant que moyens de conservation des sols cultivés.
3) Les procédés spéciaux de conservation du sol.
4) Établissement d'un plan de conservation du sol sur la ferme.

Analyse de l'éditeur.

BOFINGER (V. J.), WHEELER (J. L.)., Sci. Ed. — DEVELOPMENTS IN FIELD EXPERIMENT DESIGN AND ANALYSIS. — Proceedings of a symposium, Saint Albert's College, University of New England Armidale, New South Wales, Australia, 3-7 september, 1973. C.A.B., Bull. 50, 1975, 196 p.

Cet ouvrage destiné aux agronomes praticiens présente 12 communications originales présentées au Symposium qui s'est tenu à Armidale en septembre 1973.

La réunion avait pour but de répondre aux besoins de l'expérimentation moderne en agriculture où les données recueillies sont maintenant trop nombreuses pour être exploitées conve-

nablement : on propose donc aux participants diverses techniques d'analyses statistiques, numériques et systématiques dont on dispose actuellement. Chaque communication est suivie d'une discussion.

En voici le sommaire :

— Introduction : conception et analyse dans les expérimentations en champ.
— Conceptions de surface de réponse.
— Mesures expérimentales répétées.
— Données absentes et non orthogonalité.
— Évaluation des composants de l'erreur.
— Introduction à quelques techniques multivariates avec les applications dans les expérimentations en champ.
— Analyse en composante principale et son utilisation dans la génération d'hypothèses et la régression multiple.
— Analyse de Pattern dans les expérimentations en champ.
— Utilisation effective des ressources de calcul.
— Le rôle de la modélisation et de l'expérimentation dans la compréhension des systèmes complexes.
— Considérations génétiques dans de grandes expérimentations en champ.
— Éléments nécessaires pour une analyse économique.

A. R.

Faculté des sciences agronomiques de l'État, centre de recherches agronomiques de gembloux. — Compte rendu des séances de la « Semaine d'étude agriculture et environnement », Gembloux, 2-6 septembre 1974. Bull. Rech. agron. Gembloux, h. s., 1974.

Ce volume contient les conférences et communications de la quatrième semaine d'étude organisée par la Faculté des Sciences agronomiques de l'État et le Centre de Recherches agronomiques de Gembloux sur le thème « agriculture et environnement ».

Le choix de ce thème est motivé par le développement nécessaire de l'agriculture moderne face aux besoins alimentaires croissants de la Société, et le désir de veiller davantage à la qualité de la vie et par là même de l'environnement, en maîtrisant les nuisances dues aux progrès technologiques.

Cette semaine a rassemblé 174 participants.

Le sommaire en est le suivant :

— agriculture et hydrologie,
— agriculture et eutrophisation des eaux de surface,
— agriculture et protection des nappes,
— aménagement de l'espace rural,
— conservation de la vie sauvage dans l'espace rural,
— protection des cultures et environnement,
— écologie des espaces verts en milieu urbain et suburbains,
— méthodes culturales modernes.

A. R.

Kezdi (A.). — Handbook of soil mechanics. — Vol. 1. Soil physics. Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1974, 294 p.

Le traité de mécanique des sols du Professeur A. Kezdi, d'abord publié en éditions hongroise et allemande, paraît maintenant en édition anglaise, après révision et mise à jour. Actuellement disponible, le premier volume, d'environ 300 pages, s'intitule : « Physique du Sol ».

Le premier tiers de cet ouvrage est consacré aux constituants du sol et à leurs propriétés.

Les constituants solides (chapitre 2) sont étudiés au niveau de leur taille, de leur forme et particulièrement de leur distribution dimensionnelle en relation avec leur densité de solide, leur surface spécifique, leur origine. Différentes caractéristiques des courbes de distribution sont discutées.

Après quelques courts rappels classiques sur l'eau et l'air dans le sol, l'auteur présente les notions de porosité, d'indice des vides, de degré de saturation et développe l'aspect jugement de la porosité : les problèmes d'assemblages de particules sont abordés et développés dans un paragraphe intéressant les mélanges ; la notion de degré de compaction est discutée.

D'autres comportements de sol sont ensuite présentés : limite de plasticité, de liquidité, de retrait, consistance et déformation des sols cohérents.

Au chapitre 3, de nombreux paragraphes sont réservés à une présentation des minéraux phylliteux : structure et méthodes d'étude, propriétés physicochimiques, assemblage des constituants argileux.

Enfin, le chapitre 4 est consacré aux classifications de sols et aux interprétations des compositions granulométriques, mais l'aspect matière organique est d'une façon générale à peine développé.

Au cours du chapitre 5, l'auteur rappelle les divers types de contraintes auxquelles peuvent être soumis les sols et présente les différentes expressions de l'équation d'équilibre des sols au repos, saturés ou non saturés, en montrant les rôles respectifs des contraintes effectives et des contraintes intersticielles. Les sols saturés sont alors étudiés lorsqu'ils sont soumis à un gradient hydraulique et l'auteur termine ce tour d'horizon très précis et très clair par l'étude des contraintes développées par les sols au cours de leur variation de volume (formule de Taylor et Bishop).

Le 6e chapitre concerne l'écoulement de l'eau par gravité : mesures de la perméabilité au laboratoire et sur le terrain (abaissement de la nappe), perméabilité des sols partiellement saturés, des sols stratifiés et anisotropes (avec exemples de calculs), écoulement potentiel bidimensionnel (Équation de Laplace), illustré par de nombreux cas particuliers. Enfin, sont présentés les mouvements capillaires de l'eau, le drainage par gravité des sols saturés, les équations du mouvement de l'eau dans les sols saturés (consolidation) et les actions du courant électrique et de la chaleur.

Dans le 7e chapitre sont présentées les théories de la répartition des contraintes dans le matériau : cercles de Mohr, critères d'écoulement, mesures des contraintes tangentielles et appareillages de mesures, sols avec cohésion et sans cohésion, drainés ou non. Ce chapitre est un excellent outil de travail car, très clairement présenté, il est très aisément utilisable.

L'auteur relie au cours du 8e chapitre l'effet de ces contraintes sur les déformations élastiques du sol et ces propriétés rhéologiques en rappelant les principaux schémas usuels. L'auteur mentionne également le tassement instantané, dû à une mise en saturation complète au cours de la compression, qu'il quantifie par un indice de « prise en masse structurale ».

Le 9e chapitre, le dernier, intéresse plus spécialement les ingénieurs des Travaux Publics et Génie Civil car il concerne les problèmes de poussées des terres, de mur de soutènement, de surface de glissement, etc.

Cet ouvrage, abondamment illustré, est un bon outil d'initiation aux problèmes de physique et de mécanique des sols. Il a l'avantage de rassembler de façon concise un ensemble de concepts et de méthodes et de faciliter ainsi la compréhension des démarches suivies par les chercheurs de différentes formations travaillant sur le sol matériau.

J.-C. F. et A. F.

CHOUARD (P.), BILDERLING (N.) de, Ed. — PHYTOTRONICS IN AGRICULTURAL AND HORTICULTURAL RESEARCH. PHYTOTRONICS III. — Paris, Gauthier-Villars, 1975. (Coll. Form. perm. Écol. Biol., dir. P. Pesson).

Au XIXe Congrès d'Horticulture de septembre 1974 à Varsovie, une session a été spécialement consacrée aux « Phytotrons dans la recherche horticole ». Les vingt communications qui la composent sont reproduites dans le présent ouvrage, ainsi que celles faisant l'objet de deux autres sessions dont les différentes communications traitent de Phytotronique ou de la transformation de l'environnement de la plante : « Les climats en cultures protégées » « Les serres en verre et en matière plastique, leur équipement, leur aménagement ». Les communications de ces trois cessions sont données *in extenso* en anglais ou en français à la suite les unes des autres. Chacune d'elles est précédée d'un résumé dans l'autre langue.

Analyse de l'éditeur.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Sciences du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1976

Dépôt légal : 1er trimestre 1976. *N° d'impression : 107*

CPPAP n° 26017

annales agronomiques

Bimestriel

1975

Vol. 26 . N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1975, **26** (6), 625-650.

LES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION DES RAYONNEMENTS X ET ÉLECTRONIQUES PAR LES RÉSEAUX ATOMIQUES ; APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'ORDRE CRISTALLIN DANS LES MINÉRAUX ARGILEUX

PREMIÈRE PARTIE : LA NATURE DES DIAGRAMMES DE DIFFRACTION X ET ÉLECTRONIQUES DES MINÉRAUX ARGILEUX ; LEUR OBSERVATION EXPÉRIMENTALE

J. MAMY

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

L'objet de la première partie de ce mémoire est de présenter, sur des bases mathématiques simples, les principes de la diffraction des rayonnements X et électroniques par les réseaux cristallins. La formation et la description des diagrammes de diffraction des réseaux bidimensionnels et tridimensionnels ainsi que l'introduction de la notion de réseau réciproque font l'objet du premier chapitre. Le deuxième chapitre est consacré aux techniques d'observation et à l'interprétation des diagrammes de diffraction X et électronique dans leur application à l'étude des minéraux argileux.

AVANT-PROPOS

Cette étude comprend deux parties distinctes :

La première est un rappel sur l'origine et la nature des diagrammes de diffraction X des minéraux, particulièrement orienté vers l'application aux argiles.

La deuxième* contient une étude sur l'évolution structurale de la montmorillonite au cours d'un processus de fixation irréversible du potassium. Les considérations contenues dans la première partie sont nécessaires à la bonne compréhension de la deuxième ; le lecteur informé pourra cependant se dispenser de la lecture de cette première partie.

* à paraître dans le nº 1, 1976 des Annales Agronomiques.

INTRODUCTION

Nous envisagerons successivement les phénomènes de diffraction X par des réseaux atomiques monodimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels. Cette présentation a l'avantage de permettre d'une part l'analyse de tous les cas possibles, et d'autre part l'introduction logique aisée de la notion de réseau réciproque, notion fondamentale en cristallographie, en ne faisant appel qu'à des connaissances mathématiques élémentaires.

I. — LA DIFFUSION DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES PAR LES RÉSEAUX ATOMIQUES

A. — *Diffusion des rayons X par un atome isolé*

Nous ne considèrerons que les radiations diffusées de longueur d'onde identique à celle de la radiation incidente : c'est la diffusion cohérente. Elle est la seule à intervenir dans les phénomènes de diffraction que nous étudions ici.

Les photons X sont diffusés par les électrons de l'atome. le noyau n'intervenant que pour une part tout à fait négligeable. Cette diffusion a lieu dans toutes les directions de l'espace entourant l'atome. Dans une direction donnée, l'intensité diffusée est fonction du nombre d'électrons de l'atome, de la longueur d'onde des rayons X utilisés et de l'angle entre la direction considérée et celle du faisceau incident. L'intensité diffusée par un atome fait donc intervenir un coefficient qui intègre ces différents paramètres, c'est le facteur de diffusion atomique (Lipson et Cochran, 1957). Il a été calculé pour tous les atomes et figure sous forme de table dans les ouvrages de cristallographie (International tables for X Ray crystallography, 1952).

B. — *Diffusion des rayons X par un réseau monodimensionnel*

Considérons une série d'atomes régulièrement disposés le long d'une droite, ce que l'on appelle une rangée et qui constitue un réseau monodimensionnel, et soit un faisceau de rayons X monochromatique de longueur d'onde λ irradiant cette rangée d'atomes et faisant avec elle un angle θ (fig. 1). Chaque atome diffuse le rayonnement incident dans toutes les directions de l'espace, mais dans une direction donnée, la combinaison des ondes issues de chaque atome donne lieu à des phénomènes d'interférences que nous allons analyser.

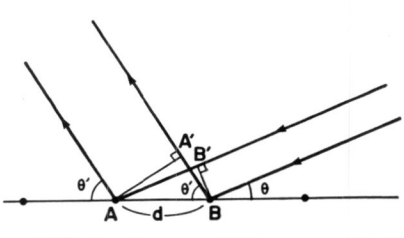


Fig. 1. — *Diffusion des rayons X par une rangée d'atomes*

A et B sont deux atomes successifs séparés par une distance d. Deux pinceaux de rayons X cohérents, issus de la même source, atteignent A et B en faisant l'angle θ avec la rangée. Considérons deux rayons diffusés parallèles, situés dans le plan de la figure et faisant l'angle θ' avec la rangée. La différence de marche entre les deux rayons diffusés est :

$$\delta = AB' - BA' = d(\cos\theta - \cos\theta')$$

on n'observera, dans cette direction, de maxima d'intensité que lorsque :

$$d(\cos\theta - \cos\theta') = n\lambda$$

ce qui signifie que pour une incidence θ donnée, il n'y a de tels maxima que pour des valeurs définies de θ'. Les rayons diffusés se répartissent donc selon des cônes ayant la rangée pour axe.

Afin de matérialiser ce résultat, nous allons utiliser une chambre photographique cylindrique, type Debye-Scherrer couramment utilisée en diffraction X, et dont le rayon est R ; le réseau monodimensionnel est placé au centre C de la chambre, et irradié sous un angle θ (fig. 2 ; sur cette figure, le réseau est représenté à une échelle arbitraire).

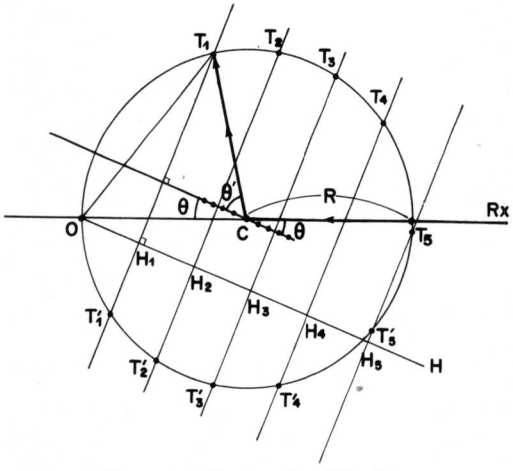


FIG. 2. — *Construction d'Ewald pour la diffusion des rayons X par une rangée d'atomes*

Le cône correspondant au premier maximum d'intensité a pour angle au sommet θ' tel que $\cos\theta' = \cos\theta - \frac{\lambda}{d}$.

Le premier maximum de noircissement du film photographique est donc observé en T_1 et T'_1 où le cône coupe la chambre de diffraction. Le segment de droite $T_1\,T'_1$ est perpendiculaire à la direction de la rangée. Abaissons de O la perpendiculaire OH à $T_1\,T_1$. Il est aisé de voir que :

$$OT_1 = 2R \sin\frac{\theta' + \theta}{2}$$

$$OH_1 = OT_1 \sin\frac{\theta' - \theta}{2}$$

d'où :

$$OH_1 = -2R \sin\frac{\theta + \theta'}{2} \sin\frac{\theta - \theta'}{2} = R(\cos\theta - \cos\theta')$$

et par suite,

$$OH_1 = R\frac{\lambda}{d} \tag{1}$$

on montrerait de même que pour les autres maxima :

$$OH_2 = 2R\frac{\lambda}{d}$$

$$OH_3 = 3R\frac{\lambda}{d}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$OH_n = nR\frac{\lambda}{d} \tag{2}$$

avec

$$\cos\theta'_n = \cos\theta - \frac{n\lambda}{d}$$

ce qui a pour conséquence

$$n\frac{\lambda}{d} \leqslant 2 \tag{3}$$

Cette inégalité a une double signification ; en effet, si l'on veut observer au moins un anneau de diffraction, il faut respecter la condition $\lambda \leqslant 2d$; d'autre part, le nombre maximum d'anneaux observés pour une longueur d'onde donnée est fixé par la combinaison des relations (2) et (3) qui entraîne :

$$OH_n \leqslant 2R \tag{4}$$

La construction géométrique de la figure 2 permet donc de déterminer avec précision les caractéristiques du phénomène de diffraction observable.

On voit que les segments OH_1, H_1H_2, H_2H_3, etc. sont égaux à $R\frac{\lambda}{d}$ et ont par conséquent une longueur indépendante de l'angle d'incidence θ. Si l'on fait tourner la figure en dehors de son plan et autour de l'axe CO qui est confondu avec le faisceau incident, on obtient l'ensemble du phénomène de diffraction observable sur la surface d'une sphère de rayon R. On constate que les anneaux de diffraction formés se trouvent à l'intersection de cette sphère et d'une série de plans perpendiculaires à la droite OH qui est elle-même parallèle à la rangée d'atomes, et équidistants de $\frac{R\lambda}{d}$. Sur la figure 2, les droites $T_1T'_1$, $T_2T'_2$ etc. représentent la trace de ces plans. Si la longueur d'onde λ et le rayon R de la sphère varient, on voit que le principe de la construction reste le même.

Lorsque la rangée pivote autour de C, c'est-à-dire lorsque θ varie, la droite OH pivote en même temps autour de O et les intersections des plans équidistants et de la sphère indiquent les directions des faisceaux diffractés par le réseau monodimensionnel pour chaque valeur de θ. Ces directions sont évidemment indépendantes du rayon de la chambre photographique avec laquelle on observe le phénomène de diffraction, mais dépendent de la longueur d'onde. Pour traduire ces deux points

importants, on substitue à la sphère de rayon R précédemment décrite une sphère de rayons $1/\lambda$ que l'on appelle « sphère d'Ewald ». Dans ces conditions, il suffit de remplacer R par $1/\lambda$ sur la figure 2, et par suite, on voit que : $OH_1 = H_1H_2$, etc. $= \frac{1}{d}$; ainsi la distance entre les plans perpendiculaires à OH qui permettent de déterminer la direction des faisceaux diffractés, devient indépendante de la longueur d'onde. La construction prend de ce fait une portée tout à fait générale pour prévoir les directions des faisceaux diffractés par un réseau linéaire d'atomes séparés par une distance constante d, et irradié par un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ. On l'appelle « construction d'Ewald ». La figure obtenue en traçant la droite OH parallèle à la rangée, et sur laquelle est portée une série de plans perpendiculaires à cette droite et équidistants de $\frac{1}{d}$, est appelée « espace réciproque » de la rangée d'atome. On voit sur la figure 2 que lorsque la rangée pivote autour de C, son espace réciproque pivote autour de O et que les intersections de l'espace réciproque et de la sphère d'Ewald matérialisent la direction des faisceaux diffractés (EWALD, 1921).

C. — *Diffraction des rayons X par un réseau bidimensionnel*

Un réseau bidimensionnel est constitué par la répétition régulière d'atomes ou de groupes d'atomes dans un plan, selon les directions de deux vecteurs de translation qui définissent les axes de coordonnées. On peut alors repérer la position de tout atome ou groupe d'atomes par deux coordonnées dont chacune est égale à un nombre entier de fois le vecteur translation correspondant (fig. 3).

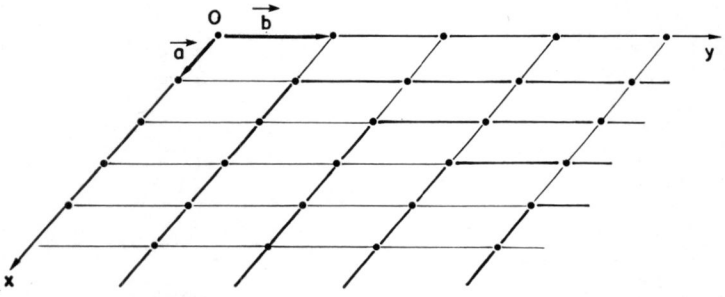


FIG. 3. — *Représentation schématique d'un réseau bidimensionnel*

L'origine est choisie sur l'emplacement d'un atome ou d'un groupe d'atomes, mais ce choix est arbitraire. L'ensemble des positions atomiques, ou « nœuds » du réseau, est matérialisé par l'intersection de deux séries de droites respectivement parallèles à $\vec{a}$ et $\vec{b}$, et équidistantes. On voit que tous les nœuds peuvent être considérés comme appartenant à deux séries de rangées, au sens défini dans le cas du réseau monodimensionnel, parallèles à $\vec{a}$ et $\vec{b}$ (renforcées sur la fig. 3).

Examinons la nature du phénomène de diffraction obtenu lorsqu'un réseau de ce type est soumis à l'irradiation d'un faisceau de rayons X. Considérons un

couple quelconque de rangées parallèles respectivement à $\vec{a}$ et $\vec{b}$. Pour chacune de ces rangées, le raisonnement qui a été appliqué au réseau monodimensionnel reste valable, et les directions des maxima de diffraction sont définies par les intersections de l'espace réciproque et de la sphère d'Ewald. Si l'on prend en compte simultanément les deux rangées, il n'y aura de maxima de diffraction que pour les angles d'incidence et de diffusion tels que la loi d'interférence soit vérifiée simultanément pour les deux rangées : c'est-à-dire pour les points communs aux espaces réciproques des deux rangées. Chaque espace réciproque étant constitué par une série de plans parallèles et équidistants, perpendiculaires à la rangée (représentés par leurs traces sur la fig. 4), les intersections des deux espaces sont des droites perpendiculaires au plan qui contient les deux rangées (LAUE, 1932).

Chaque couple de rangées parallèles à $\vec{a}$ et $\vec{b}$ donne évidemment le même espace réciproque ; cet espace réciproque est matérialisé sur la figure 4 par des points représentant les intersections des droites réciproques avec le plan de la figure. Par commodité, on a reporté les vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{b}$ à l'origine de l'espace réciproque.

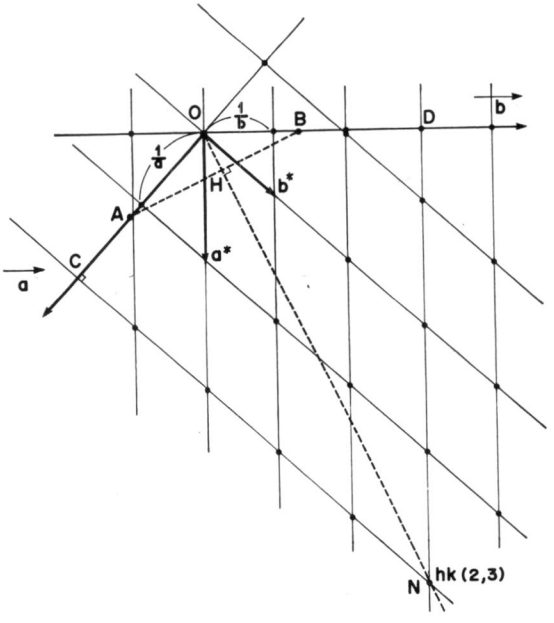


FIG. 4. — *Réseau réciproque d'un réseau bidimensionnel*

Les plans espace réciproque des deux rangées sont perpendiculaires au plan de la figure et équidistants d'une part de $\frac{1}{a}$ et d'autre part de $\frac{1}{b}$. Les droites qui forment les intersections de ces deux séries de plans sont également perpendiculaires au plan de la figure et situées aux nœuds d'un réseau plan dont nous pouvons définir les caractéristiques des vecteurs de base $\vec{a^*}$ et $\vec{b^*}$ par les relations suivantes, déduites immédiatement de la figure 4 :

$$\vec{a^*} \cdot \vec{a} = 1$$
$$\vec{b^*} \cdot \vec{b} = 1$$

qui traduisent les relations de longueur, et

$$\vec{a^*} \cdot \vec{b} = 0$$
$$\vec{b^*} \cdot \vec{a} = 0$$

qui traduisent les relations de perpendicularité.

Le nouveau réseau plan obtenu est appelé « réseau réciproque » du réseau atomique, qui est lui-même appelé « réseau direct ». On voit d'ailleurs, d'après les relations ci-dessus, que le réseau direct est le réseau réciproque du réseau réciproque.

Chaque nœud du plan $(\vec{a^*}, \vec{b^*})$ est repéré par deux indices entiers h et k, qui représentent ses coordonnées en prenant $\vec{a^*}$ et $\vec{b^*}$ comme vecteur unité sur les axes. La droite réciproque qui passe par un nœud hk est appelée ligne hk.

Nous allons montrer qu'il existe une relation simple entre les indices hk d'une ligne réciproque et des repères géométriques des réseaux directs et réciproques.

Revenons à la figure 4. Prenons un nœud quelconque hk dans le plan $\vec{a^*}$, $\vec{b^*}$. Joignons ce nœud N à l'origine O. Du point A pris sur le vecteur $\vec{a}$ du réseau direct, et tel que $\overrightarrow{OA} = \frac{\vec{a}}{h}$, abaissons la perpendiculaire sur ON en H qui coupe la droite portant le vecteur $\vec{b}$ au point B. Soient enfin C et D les projections de N sur $\vec{a}$ et $\vec{b}$.

Nous avons les relations suivantes :

$$OA = \frac{a}{h} \qquad OC = \frac{h}{a} \qquad OD = \frac{k}{b}$$

De la comparaison des triangles rectangles semblables OCN et OHA, il vient :

$$ON = \frac{1}{OH} = \frac{1}{d},$$

si nous posons $OH = d$, distance de O à la droite AB.

De la comparaison des triangles rectangles semblables ODN et OHB, il vient :

$$\frac{OD}{ON} = \frac{OH}{OB},$$

soit $OB \cdot OD = OH \cdot ON$

d'où $OB \cdot OD = 1$

et par suite $OB = \frac{b}{k}$.

Pour résumer, nous voyons que la droite qui joint l'origine au nœud hk du réseau réciproque est perpendiculaire à la droite qui découpe, sur les axes du réseau direct, des vecteurs égaux à $\frac{\vec{a}}{h}$ et $\frac{\vec{b}}{k}$. Par convention, nous appellerons cette droite, la

droite (*hk*) du réseau direct. D'autre part, la longueur du vecteur qui joint l'origine au nœud *hk* du réseau réciproque est égale à l'inverse de la distance de l'origine du réseau direct à la droite (*hk*). Il est aisé de voir que ce raisonnement reste entièrement valable si les origines du réseau direct et du réseau réciproque ne sont pas confondues. Remarquons enfin que la droite (*hk*) du réseau direct est perpendiculaire au plan du réseau réciproque passant par l'origine et contenant la ligne réciproque *hk* du réseau bidimensionnel.

En conclusion, l'espace réciproque d'un réseau bidimensionnel est formé par une série de droites perpendiculaires au plan du réseau direct et situées aux nœuds du réseau réciproque du réseau bidimensionnel. Le diagramme de diffraction d'un tel réseau peut être étudié, comme celui d'un réseau monodimensionnel, à l'aide de la construction d'Ewald. Nous verrons que ces conclusions sont très importantes pour l'étude des minéraux argileux.

D. — *Diffraction des rayons X par un réseau tridimensionnel*

Un réseau tridimensionnel est constitué par la répétition régulière d'atomes ou de groupes d'atomes dans l'espace, selon les directions de trois vecteurs de translation qui définissent les axes de coordonnées. Pour réaliser un tel réseau, il suffit donc d'ajouter au réseau bidimensionnel du paragraphe précédent une troisième rangée de direction quelconque par rapport aux deux premières ; elle sera définie par un vecteur $\vec{c}$.

L'irradiation d'un réseau tridimensionnel par un faisceau de rayons X ne donnera lieu à des maxima de diffraction que dans des directions de l'espace telles que les conditions d'interférences constructives soient vérifiées simultanément pour les trois rangées définissant le réseau, c'est-à-dire pour les points communs aux espaces réciproques des trois rangées.

L'espace réciproque de la troisième rangée est formée par une série de plans perpendiculaires à cette rangée et équidistants de $1/c$. Cette série de plans coupe les lignes réciproques communes aux deux premières rangées en une série de points équidistants ; seuls ces points sont communs aux trois espaces réciproques des trois rangées, et constituent l'espace réciproque du réseau tridimensionnel. En considérant les rangées deux par deux et en appliquant le même raisonnement que pour le réseau bidimensionnel, il est aisé de montrer : que les points de l'espace réciproque sont répartis aux nœuds d'un réseau tridimensionnel de vecteurs $\vec{a}^*$, $\vec{b}^*$, $\vec{c}^*$, appelé réseau réciproque du réseau direct $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$.

Les relations liant les deux réseaux sont les suivantes :

$$\vec{a}^* \cdot \vec{a} = 1$$
$$\vec{b}^* \cdot \vec{b} = 1$$
$$\vec{c}^* \cdot \vec{c} = 1$$

qui traduisent les relations de longueur, et

$$\vec{a}^* \cdot \vec{b} = 0 \qquad \vec{b}^* \cdot \vec{a} = 0 \qquad \vec{c}^* \cdot \vec{a} = 0$$
$$\vec{a}^* \cdot \vec{c} = 0 \qquad \vec{b}^* \cdot \vec{c} = 0 \qquad \vec{c}^* \cdot \vec{b} = 0$$

qui traduisent le fait que $\vec{a}^*$ est perpendiculaire au plan $(\vec{b}, \vec{c})$, $\vec{b}^*$ au plan $(\vec{a}, \vec{c})$ et $\vec{c}^*$ au plan $(\vec{a}, \vec{b})$. Chaque nœud du réseau réciproque est défini par ses coordonnées h, k et l en prenant les vecteurs $\vec{a}^*$, $\vec{b}^*$ et $\vec{c}^*$ comme vecteurs unitaires sur les axes, et est appelé nœud *hkl* (LIPSON et COCHRAN, 1957).

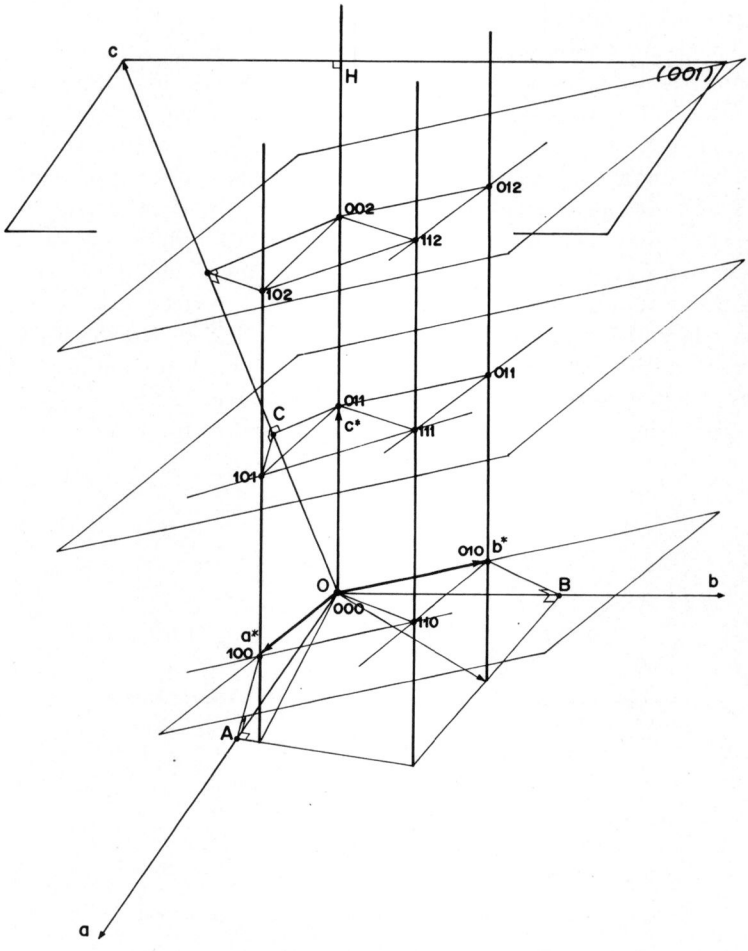


FIG. 5. — *Réseau réciproque d'un réseau tridimensionnel*

La figure 5 représente le réseau réciproque d'un réseau *abc* ; on a tracé les vecteurs $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ et $\vec{a}^*$, $\vec{b}^*$, $\vec{c}^*$ à partir de la même origine O. On a également fait figurer les indices des nœuds *hkl* visibles sur le dessin, ainsi que différents plans du réseau réciproque et le plan (001) du réseau direct.

Nous avons vu à propos du réseau bidimensionnel que la droite qui joint l'origine du réseau réciproque à un point quelconque d'une ligne *hk* est normale à la droite (*hk*) du réseau direct, et que la longueur du vecteur qui joint l'origine au nœud *hk* est égale à l'inverse de la distance de l'origine à la droite (*hk*). Le même raisonnement

peut être suivi ici en prenant deux à deux les rangées a, b, et c du réseau direct. On montre ainsi que la droite qui joint l'origine au nœud hkl du réseau réciproque est simultanément normale aux droites (hk), (kl), et (hl) du réseau direct, c'est-à-dire au plan qui découpe sur les trois axes des vecteurs égaux à $\frac{a}{h}$, $\frac{b}{k}$ et $\frac{c}{l}$. Ce plan est appelé plan (hkl) du réseau direct et les indices hkl en sont les « indices de Miller ». De plus la distance d_{hkl} du plan (hkl) à l'origine du réseau direct est égale à l'inverse du vecteur qui joint l'origine du réseau réciproque au nœud hkl.

Examinons maintenant les applications pratiques des différentes conclusions de ce paragraphe ; elles sont aisément présentées à l'aide de la construction d'Ewald, figure 6. Un cristal est placé au centre C de la sphère d'Ewald de rayon $1/\lambda$. En prenant comme origine le point O où le faisceau de rayons X coupe cette sphère, on peut construire le réseau réciproque, dont nous ne représenterons qu'une rangée quelconque pour simplifier la figure. Lorsque le cristal tourne autour d'un axe perpendiculaire en C à la figure, le réseau réciproque tourne en O autour d'un axe parallèle ; dans ce mouvement, les nœuds du réseau réciproque traversent successivement la sphère d'Ewald. Au moment où un nœud T se trouve sur la sphère, existe un faisceau diffracté de direction CT. Comme nous l'avons montré ci-dessus, la droite OT est perpendiculaire au plan (hkl) du réseau direct correspondant au nœud T. Nous représentons ce plan sur la figure 6 par la droite CH.

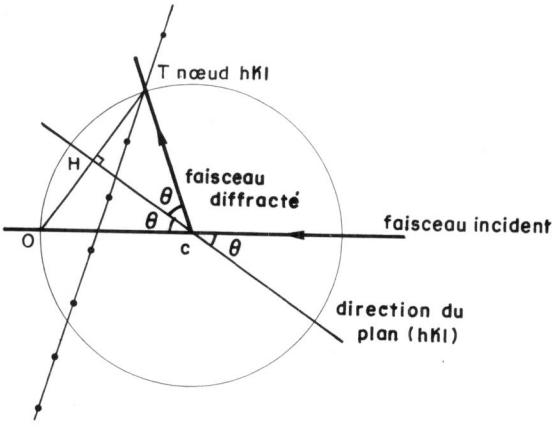


FIG. 6. — *Construction d'Ewald pour un réseau tridimensionnel ; établissement de la loi de Bragg*

Les angles OCH et HCT sont égaux entre eux et à l'angle θ du faisceau incident avec le plan (hkl).

D'autre part, $OT = \frac{1}{d_{hkl}}$ comme nous l'avons montré ci-dessus, et par construction $OC = \frac{1}{\lambda}$, ce qui conduit à la relation :

$$2\, d_{hkl} \sin \theta = \lambda$$

c'est la loi de Bragg (BRAGG, 1913).

On voit aussi sur la figure que les angles des faisceaux incidents et diffractés avec le plan (*hkl*) sont égaux : c'est ce qui fait parler de « réflexions » ou de « réflexions de Bragg » à propos des phénomènes de diffraction par les réseaux tridimensionnels, la distance d_{hkl} étant considérée comme la distance entre des plans parallèles successifs. La sphère d'Ewald est pour cette même raison appelée fréquemment « sphère de réflexion ».

E. — *Conclusion*

L'étude des phénomènes de diffusion des rayons X par des réseaux de complexité croissante permet de présenter aisément le concept de réseau réciproque. Celui-ci constitue un outil très général de description des spectres de diffraction X des réseaux cristallins. La relation réseau direct-réseau réciproque donne le moyen de prévoir le diagramme de diffraction d'un cristal de structure connue, lorsqu'on en fixe l'orientation par rapport au faiseau de rayons X, pour un montage et une longueur d'onde déterminés. A l'inverse, l'observation du diagramme de diffraction X d'un cristal donne une image du réseau réciproque qui permet de décrire le réseau direct, donc les caractéristiques géométriques du réseau du cristal.

Nous n'avons envisagé dans ce chapitre que les aspects purement géométriques de la description des réseaux directs et réciproques, car ils sont le point de départ de la connaissance des réseaux cristallins. La répartition des atomes dans le réseau, selon leur nature, peut être étudiée à partir des intensités des taches de diffraction : la distribution de l'intensité dans la section d'un faisceau diffracté de direction donnée, c'est-à-dire correspondant à un point d'une ligne *hk* ou à un nœud *hkl* du réseau réciproque, est en effet une fonction des éléments géométriques du réseau cristallin et de sa composition chimique. A chaque point d'une ligne réciproque d'un réseau bidimensionnel ou à chaque nœud réciproque d'un réseau tridimensionnel, peut être associée une valeur chiffrée appelée « facteur de structure » (BUERGER, 1960). L'intensité diffractée lorsqu'un point d'une ligne *hk* ou un nœud *hkl* se trouve sur la sphère d'Ewald (on parle dans le second cas de « réflexion *hkl*) est proportionnelle au carré du facteur de structure. L'indexation des différentes taches observées et la mesure de leurs intensités est à l'origine du calcul des structures cristallines.

Remarquons enfin que l'ensemble des notions qui ont été présentées ne fait pas intervenir spécifiquement la longueur d'onde des rayons X, ce qui signifie que tous les raisonnements suivis restent applicables dans leur principe à d'autres longueurs d'onde, à condition toutefois de respecter la condition imposée par la loi de Bragg :

$$\lambda \leqslant 2\, d_{hkl}$$

c'est en particulier le cas très important de la *diffraction des électrons* (VAINSHTEIN, 1964), dont la longueur d'onde est de 10 à 100 fois plus courte que celle des rayons X. Les spectres de diffraction observés sont de nature identique à ceux que l'on obtient avec les rayons X. Les conditions expérimentales sont différentes puisqu'il faut opérer sous le vide poussé du microscope électronique. Le faisceau d'électrons utilisé peut être extrêmement fin, ce qui a l'avantage de permettre l'étude de cristaux de très petite taille : le champ irradié a généralement un diamètre de l'ordre du micron, et sur certains appareils, il est possible de le limiter à 0,1 μm.

La sphère d'Ewald, en raison des courtes longueurs d'onde utilisées, a un très grand rayon. Ce fait, étant donné la géométrie du microscope électronique, limite considérablement le domaine observable de l'espace réciproque (l'angle 2θ ne peut guère dépasser 5°). Les possibilités de rotation de l'échantillon dans le faisceau d'électrons sont également très réduites. Malgré ces limites, la microdiffraction électronique, combinée à la microscopie, est un outil très précieux car elle permet d'étudier simultanément la morphologie et le diagramme de diffraction de très petites particules.

II. — APPLICATION A L'ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX

Un cristal idéal serait constitué par une structure tridimensionnelle parfaitement régulière et de dimensions infinies. La représentation du réseau réciproque d'un tel réseau attribuerait à chaque nœud *hkl* un volume quasiment ponctuel dont le « poids » serait égal au facteur de structure F_{hkl}. Le diagramme de diffraction X obtenu serait formé de raies très fines dans le cas de la diffractométrie, ou de taches ponctuelles dans le cas de la photographie. Bon nombre de cristaux s'approchent de cette perfection, et parmi les silicates phylliteux, certains micas, mais ce n'est pas le cas général, et les imperfections cristallines se traduisent par des altérations des diagrammes de diffraction X que nous allons étudier dans le cas des minéraux argileux.

Les principaux caractères physiques des minéraux argileux qui nous intéressent ici sont :

— la faible taille et la forme des cristallites élémentaires,
— les imperfections du réseau des feuillets élémentaires,
— les désordres de superposition des feuillets dans un cristallite élémentaire.

Nous examinerons successivement les effets de ces différentes caractéristiques sur les diagrammes de diffraction X.

A. — *Forme et dimensions des cristallites*

L'effet sur les diagrammes de diffraction X de la réduction des dimensions des cristaux peut être simplement prévue à partir des notions sur les réseaux réciproques.

En effet, si une des dimensions d'un cristal devient très faible par rapport aux deux autres, sa forme est celle d'une plaquette ; à la limite c'est un plan, et nous avons vu que le réseau réciproque est alors formé par des lignes continues, perpendiculaires au plan. L'aplatissement d'un cristal se traduit donc par un allongement des nœuds du réseau réciproque dans la direction perpendiculaire au plan de la plaquette cristalline.

Si deux des dimensions du cristal sont très faibles par rapport à la troisième, sa forme est celle d'une aiguille ; à la limite, c'est une rangée cristalline, et le réseau réciproque est formé par des plans perpendiculaires à la rangée. L'allongement

d'un cristal produit donc un étalement des nœuds du réseau réciproque dans un plan perpendiculaire à la direction d'allongement.

En associant les deux observations précédentes, on voit que la diminution de taille d'un cristal a pour effet de substituer aux nœuds ponctuels théoriques du réseau réciproque, des volumes définis entourant ces nœuds. La forme et les dimensions de ces volumes sont liées à la forme et aux dimensions du cristallite.

Une autre conséquence bien connue de la diminution de tailles des cristaux est qu'il n'est plus possible d'obtenir de diagrammes de monocristaux en diffraction X, mais que l'on peut seulement observer des diagrammes de poudre. Ce sont donc les profils des raies et leur largeur qui traduiront la forme et les dimensions des cristallites.

B. — *Imperfections du réseau*

Ces imperfections sont de différents types : distorsions des plans, déplacements de groupes d'atomes, vacances, substitutions, etc. ; elles correspondent toutes en fin de compte à une altération de la régularité de distribution des atomes dans le réseau par rapport à leurs positions théoriques. Par suite, les phénomènes d'interférence des ondes diffusées ne sont plus rigoureusement déterminés du point de vue angulaire, ce qui se traduit d'une part, par une diminution des intensités totales des « réflexions de Bragg » et par leur élargissement, et d'autre part, par l'apparition de phénomènes de diffusion en dehors des taches de Bragg (GUINIER, 1966 ; GATINEAU *et al.*, 1972).

C. — *Désordres de superposition des feuillets élémentaires*

Nous insisterons plus longuement sur ce cas, car il est caractéristiques des minéraux argileux.

C'est un type particulier de désordre qui est dû au fait que l'ordre tridimensionnel qui est réalisé dans des minéraux tels que les micas, par la superposition rigoureuse des motifs atomiques en passant d'un feuillet élémentaire au suivant, est détruit à des degrés divers dans les minéraux argileux par des rotations et des glissements des feuillets les uns par rapport aux autres.

On parle de glissement lorsque les axes cristallographiques des différents feuillets élémentaires restent parallèles entre eux. Ces glissements peuvent avoir une certaine régularité s'ils font intervenir une fraction constante d'un des paramètres, par exemple $\vec{b}/3$, qui est un cas assez fréquent.

Les rotations des feuillets les uns par rapport aux autres peuvent, de même, respecter des angles définis ; par exemple 60° ou 120°, ce qui, combiné à la structure pseudo-hexagonale du réseau des argiles, introduit une structure tridimensionnelle caractéristique.

Enfin, lorsque les rotations et les glissements existent simultanément et se produisent au hasard, on parle de *structure « turbostratique »* (OBERLIN et MERING, 1962). Dans ce dernier cas, le seul caractère tridimensionnel est le parallélisme des plans d'allongements des feuillets (plans (001)) et la valeur constante de la distance qui sépare ces plans (fig. 7).

Nous pouvons examiner maintenant les effets de ces différents types de désordres sur les diagrammes de diffraction X.

Pour déterminer la nature du diagramme de diffraction des minéraux phylliteux en tenant compte du type de superposition des feuillets élémentaires, on procède toujours en partant du feuillet considéré comme unité structurale, puis on passe au cristallite qui correspond à l'empilement d'une dizaine ou de quelques dizaines de feuillets élémentaires. Enfin, on généralise au cas de la poudre formée d'un très grand nombre de cristallites.

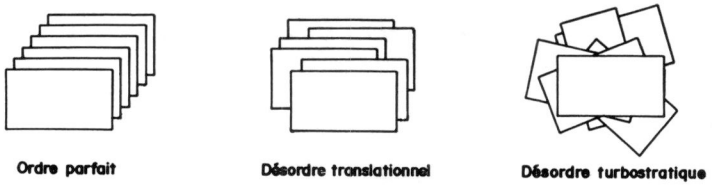


FIG. 7. — *Représentation schématique de différents types de superposition des feuillets élémentaires d'un silicate phylliteux*

1. *Diagramme de diffraction du feuillet élémentaire isolé.*

Ce cas pratiquement très rare ne peut être observé qu'en microdiffraction électronique et jamais en diffraction X. Nous verrons cependant qu'il est applicable au minéral turbostatique.

Si l'on considère un feuillet élémentaire isolé, on voit qu'il est constitué par la répétition d'un motif cristallin, la maille élémentaire, selon les deux directions $\vec{a}$ et $\vec{b}$ qui définissent le plan du feuillet (fig. 8). C'est strictement la définition d'un réseau bidimensionnel.

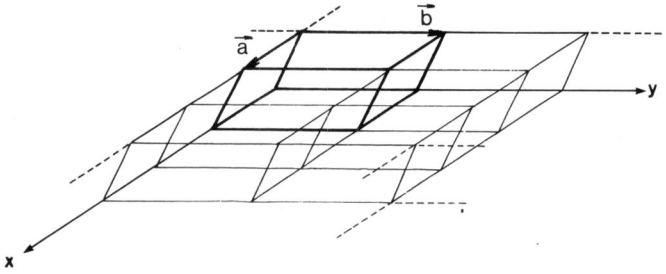


FIG. 8. — *Réseau bidimensionnel d'un feuillet d'un silicate phylliteux*

L'espace réciproque du feuillet élémentaire est donc formé par une série de droites perpendiculaires au plan $(\vec{a}, \vec{b})$ et passant par les nœuds hk du réseau réciproque $(\vec{a^*}, \vec{b^*})$. Ces nœuds sont répartis selon un réseau hexagonal car pour un minéral argileux $a^*/b^* = \sqrt{3}$.

La valeur de l'intensité diffusée lorsqu'un point d'une ligne réciproque se trouve sur la sphère d'Ewald est, comme nous l'avons signalé au début de ce chapitre, proportionnelle au carré du facteur de structure en ce point. Le facteur de structure prend une valeur maximum au voisinage du nœud hk et décroît à mesure que l'on s'éloigne de celui-ci le long de la ligne hk. La variation du facteur de structure le long de la ligne, et à l'intérieur d'une section de cette ligne, dépend de la nature du réseau et de ses caractéristiques physiques (dimensions, forme, imperfections, etc.).

2. *Diagramme de diffraction d'un minéral phylliteux turbostratique.*

Les feuillets successifs étant superposés sans ordre, chacun d'eux constitue en fait un réseau bidimensionnel indépendant. Pour un cristallite comprenant par exemple une dizaine de feuillets, l'espace réciproque est formé par l'ensemble des lignes réciproques correspondant à chaque feuillet. Celles-ci se répartissent suivant une série de cylindres concentriques ayant pour axe commun la ligne oo (fig. 9).

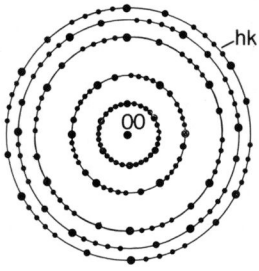


FIG. 9. — *Vue en projection dans le plan (a*, b*) de l'espace réciproque d'un silicate phylliteux turbostratique*

La ligne oo est commune aux espaces réciproques de tous les feuillets, les intensités diffusées correspondantes sont donc beaucoup plus fortes que pour les autres lignes *hk*. On remarque d'autre part que le passage d'un feuillet, considéré comme unité structurale, au suivant, est obtenu dans un cristallite par une translation $\vec{d}$ suivant la normale aux feuillets (d étant l'épaisseur d'un feuillet). Selon cette direction, le cristallite peut être assimilé à un réseau monodimensionnel ; l'espace réciproque de ce réseau est formé par une série de plans parallèles aux feuillets et équidistants de $\frac{1}{d}$. Le facteur de structure prend, dans ces plans, une valeur maximum au voisinage de la normale. Par suite, les intensités diffusées seront maxima pour les points communs aux espaces réciproques des réseaux bidimensionnels de chaque feuillet et du réseau monodimensionnel du cristallite formé par l'ensemble de ces feuillets. Ces maxima n'apparaissent pratiquement qu'à l'intersection de la ligne oo et des plans réciproques, sous forme de nœuds individualisés équidistants de $\frac{1}{d}$: ce sont les nœuds ool. L'existence de cette rangée (001) traduit le caractère partiellement tridimensionnel de ce type de réseau. On notera que la loi de Bragg ne s'applique effectivement que dans le seul cas des plans (ool).

Pour résumer, on voit que l'espace réciproque d'un cristal turbostratique est formé par une série de lignes réciproques *hk* de directions perpendiculaires au plan d'allongement des feuillets, et d'une rangée de nœuds ool équidistants de $\frac{1}{d}$ (fig. 10).

La valeur du facteur de structure en chaque point de l'espace réciproque est évidemment fonction de la nature cristallochimique du minéral, mais également des dimensions du cristallite et des imperfections de son réseau. A chaque niveau de cote z à partir du plan (a^*, b^*), la section de la ligne réciproque et la valeur du

facteur de structure en chaque point de cette section, sont fonction de ces différents éléments (WARREN, 1941). Nous allons voir que le profil des bandes de diffraction observées à partir d'un diagramme de poudre intègre ces données.

Une poudre est formée par un très grand nombre de cristallites élémentaires orientés au hasard. L'espace réciproque d'une poudre est donc constitué par la combinaison à partir d'une origine commune, des espaces réciproques de chaque cristallite. Il est aisé de montrer (cf. fig. 10) que tous les nœuds réciproques de mêmes indices *hk* sont situés sur une même sphère dont le rayon est égal à la distance de l'origine de l'espace réciproque à un des nœuds *hk*. De même, les nœuds ool sont situés sur des sphères de rayons $\frac{1}{d}$, $\frac{2}{d}$ etc.

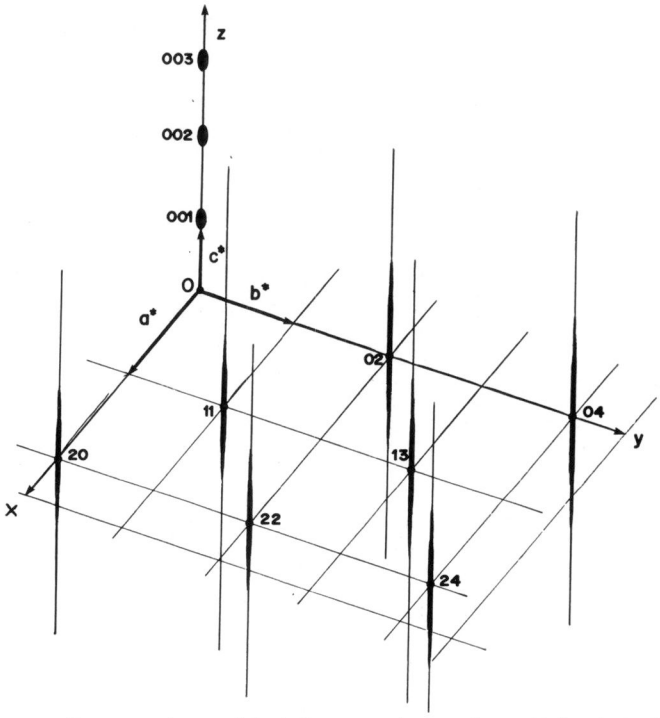


FIG. 10. — *Représentation partielle de l'espace réciproque d'un cristal turbostratique*

Les intersections de ces différentes sphères avec la sphère d'Ewald donnent une série de cercles dont chacun contient l'ensemble des points où tous les nœuds de mêmes indices *hk* ou ool traversent la sphère d'Ewald, lorsque la poudre, contenue dans un tube transparent aux rayons X, tourne dans le faisceau (fig. 11).

Si l'on place un film photographique plan, perpendiculairement au faisceau incident, on observe une série d'anneaux concentriques dont certains correspondent aux raies ool et les autres, aux bandes *hk*. La distribution des intensités diffractées dans la section d'un anneau, c'est-à-dire le profil de la courbe que l'on obtient par densitométrie radiale d'un film photographique, ou par diffractométrie, représente la somme des intensités correspondant au passage de chaque ligne *hk* ou de

chaque nœud ool à travers la sphère d'Ewald. Ce profil est identique, à un facteur d'échelle près, à celui que l'on obtiendrait à partir d'une seule ligne *hk* ou d'une seule rangée (001).

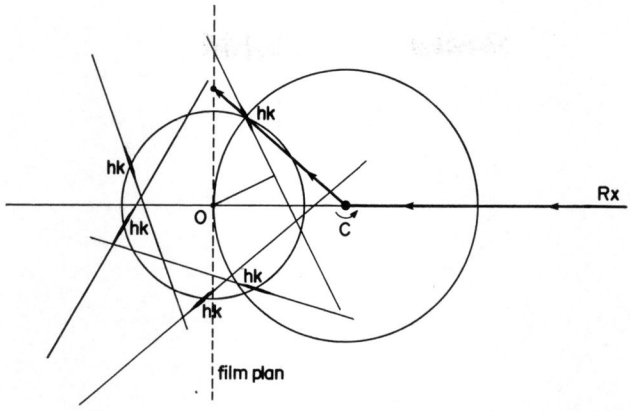


FIG. 11. — *Passage des lignes réciproques hk au travers de la sphère d'Ewald.*

2. 1. *Formation des raies* ool (fig. 12).

La rangée réciproque (001) tourne autour de O quand le cristallite tourne autour de C, et lorsqu'un nœud de cette rangée traverse la sphère d'Ewald, un faisceau diffracté prend naissance. Le nœud ool n'est pas ponctuel. Le volume qui le définit est sensiblement symétrique par rapport au plan perpendiculaire à la rangée (001) et

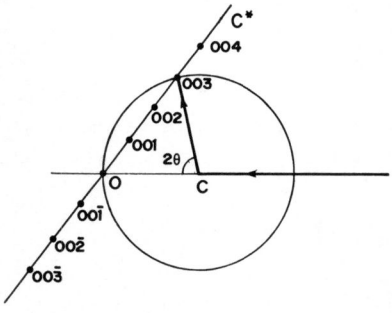


FIG. 12. — *Formation des raies* ool

passant par le centre du nœud ; il en résulte que le profil de la raie observée est également symétrique, sa largeur étant fonction des dimensions du cristallite. L'intensité totale correspondant à la surface du pic est, quant à elle, fonction de la nature cristallochimique du cristal. D'autre part, les nœuds ool étant équidistants sur la rangée, la série des raies ool forme ce que l'on appelle une « *série rationnelle* ».

2. 2. *Formation des bandes hk.*

Comme nous l'avons déjà signalé, le facteur de structure décroît le long d'une ligne *hk* à partir d'une valeur maximum au niveau du nœud *hk*o et, de plus, varie

dans la section de la ligne ; c'est ce que nous représentons sur la figure 13 *a* par un noircissement variable de la projection de la ligne sur le plan de la figure.

Pour plus de clarté, la figure 13 *a* est construite à une échelle tout à fait arbitraire. On voit que, lorsque la ligne *hk* traverse la sphère d'Ewald en restant à distance constante du point O, l'intensité en chaque point de la sphère est la somme

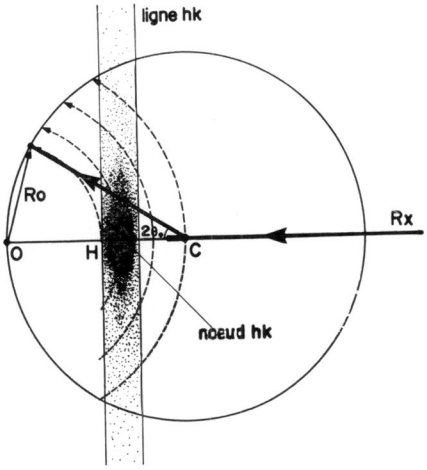


FIG. 13 *a*. — *Formation des raies de diffraction hk*

des intensités le long de chaque arc de cercle centré sur O et de rayon croissant à partir de $R_0 = OH$. Par suite, le profil de la raie a l'allure donnée par la figure 13 *b*. Ce profil traduit bien la distribution des intensités le long de la ligne *hk*. Il est effectivement possible de remonter du profil observé expérimentalement à la structure de l'espace réciproque. C'est un calcul assez complexe et nous renvoyons le lecteur intéressé à la bibliographie ; son principe consiste à comparer le profil observé à des profils calculés à partir d'hypothèses sur la valeur des facteurs de structure le long des lignes *hk* (MERING, 1949 ; BRINDLEY et MERING, 1951 ; WILSON, 1949).

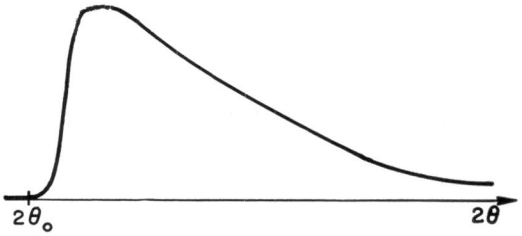


FIG. 13 *b*. — *Profil d'une raie hk*

3. *Diagramme de diffraction d'un minéral partiellement ordonné.*

3. 1. *Glissements.*

Dans ce type de désordre, les axes cristallographiques des feuillets successifs restent parallèles entre eux. Il n'y a cependant pas d'ordre tridimensionnel si les glissements ne font pas intervenir de vecteurs de translation de valeur constante. L'espace

réciproque d'un cristallite est formé par une série unique de lignes *hk* puisqu'il résulte de la superposition, à partir d'une origine commune, des espaces réciproques de chaque feuillet élémentaire.

Pour des translations au hasard, il n'y a pas de modulation des facteurs de structure le long des lignes *hk* ; la situation est la même que pour le désordre turbostratique.

Dans le cas de translations régulières, les profils de certaines raies, d'indices déterminés, peuvent être spécifiquement modifiés, compte tenu en particulier de la nature pseudo hexagonale du réseau cristallin des minéraux argileux (par exemple, pour des translations $\pm \vec{b}/3$, modification des raies *hk* où *k* est multiple de 3 ; LONGUET-ESCARD *et al.*, 1961).

Pour un diagramme de poudre, on se trouve dans la situation du minéral turbostratique puisque les cristallites élémentaires sont orientés au hasard les uns par rapport aux autres.

3. 2. *Rotations.*

C'est encore la nature pseudo-hexagonale du réseau de ces minéraux qui peut créer des situations partiellement ordonnées. Les lignes *hk* de l'espace réciproque du feuillet isolé sont, en effet, comme nous l'avons déjà signalé, réparties aux nœuds d'un réseau plan hexagonal ; si la superposition des feuillets ne fait intervenir entre les axes que des angles égaux à des multiples de 60°, les lignes réciproques *hk* d'un cristallite constituent une série unique, chacune d'elles résultant de la superposition des différentes lignes ayant la même localisation, mais non nécessairement les mêmes indices.

De plus, une modulation de l'ensemble des lignes apparaît au niveau des nœuds du réseau tridimensionnel correspondant. Cette modulation est d'autant plus prononcée que la régularité du réseau est proche d'un ordre tridimensionnel parfait.

Sur un diagramme de poudre, cet effet se manifeste par une modulation des profils des bandes de diffraction (MERING, 1949 ; GATINEAU *et al.*, 1972).

III. — OBSERVATION EXPÉRIMENTALE DES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION PAR LES MINÉRAUX ARGILEUX

A. — *Diffraction des rayons X*

Deux types de méthodes sont utilisées : les méthodes photographiques et les méthodes diffractométriques.

Les méthodes photographiques présentent l'avantage d'une très grande souplesse d'utilisation et d'une grande richesse d'informations, mais ne sont pas d'une précision très élevée en ce qui concerne la détermination des paramètres cristallins ou des intensités des taches de diffraction.

En diffractométrie classique, on n'observe le phénomène de diffraction des rayons X que dans le plan de rotation du compteur qui contient également le faisceau

incident. Par suite, ne donnent de rayons diffractés décelables que les cristallites orientés de manière que les lignes réciproques *hk* ou la rangée (001), soient dans le plan de rotation du compteur. Ce fait limite beaucoup les possibilités d'observations, mais la précision de mesure de la position des pics de diffraction et de leurs intensités est excellente.

1. *Diagrammes de poudre.*

Nous avons déjà décrit ce cas dans les précédents paragraphes. Les cristallites formant l'échantillon sont orientés au hasard.

En photographie, quelques milligrammes de poudre sont contenus dans un tube transparent aux rayons X, qui tourne régulièrement dans le faisceau. Le film peut être plan ou enroulé sur un cylindre d'axe perpendiculaire à la direction du faisceau incident ; on observe une série d'anneaux concentriques homogènes correspondant à l'ensemble des raies 00*l* et des bandes *hk*.

En diffractométrie, la poudre, dont la surface est aplanie, est généralement immobile pour un angle d'incidence donné, mais sa masse est importante, environ 200 mg. Par suite, s'y trouvent des cristallites orientés dans toutes les directions. Le déplacement du compteur permet d'enregistrer successivement l'ensemble des raies 00*l* et des bandes *hk* observables.

2. *Dépôts orientés.*

La morphologie particulière des minéraux argileux, c'est-à-dire la forme en plaquette des cristallites élémentaires, permet la formation, à partir de suspensions aqueuses, de dépôts plans dans lesquels les cristallites présentent une orientation préférentielle suivant le plan de la surface sur laquelle se forme le dépôt. De ce fait, toutes les perpendiculaires au plan de base des cristallites, donc tous les axes *c**, sont parallèles entre eux. Nous pouvons décrire l'espace réciproque d'une plaquette découpée dans un dépôt orienté ; il a l'allure donnée par la figure 14.

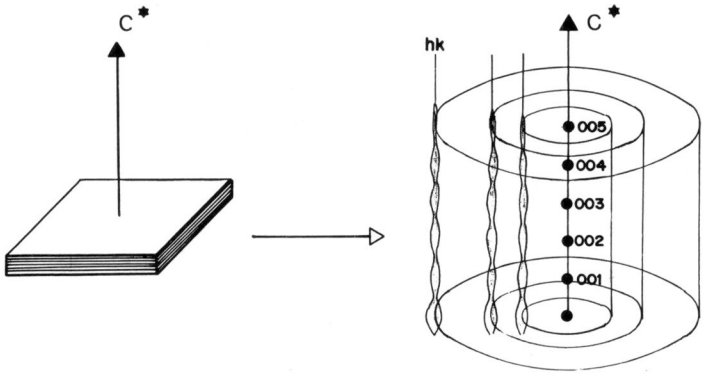


FIG. 14. — *Représentation schématique de l'espace réciproque d'une plaquette formée de cristallites orientés parallèlement au plan du dépôt*

Les lignes réciproques *hk* sont parallèles entre elles et à la direction *c**. Les lignes de mêmes indices *hk* sont distribuées selon les génératrices d'un cylindre. L'espace réciproque est donc formé par la rangée (001) et par une série de cylindres

concentriques donc chacun est constitué par un ensemble de lignes *hk*. Nous examinerons maintenant la nature des différents diagrammes de diffraction X que l'on peut obtenir à partir d'un échantillon de cette nature.

2. 1. *Rotation de la plaquette autour d'un axe perpendiculaire à c*.*

L'axe de rotation se trouve dans le plan (*a*, *b*), c'est-à-dire dans le plan du feuillet.

Si l'échantillon fait un tour complet sur lui-même, on voit, d'après la figure 14, que le diagramme photographique présentera la série des raies 00*l* localisées sur un axe perpendiculaire à l'axe de rotation de la plaquette, et une série d'anneaux concentriques correspondant aux bandes *hk*. On peut également limiter la rotation de la plaquette ; nous en citerons deux exemples :

2. 1.1. *Oscillations de* 0 *à* $\frac{\pi}{2}$ (1).

La figure 15 illustre cette disposition.

On voit que les raies 00*l* apparaissent seulement sur la moitié supérieure du cliché, et sont localisées sur un axe perpendiculaire à l'axe de rotation de la plaquette. Les bandes *hk* occupent surtout la moitié inférieure du cliché, sous forme d'arcs de cercles plus ou moins étendus.

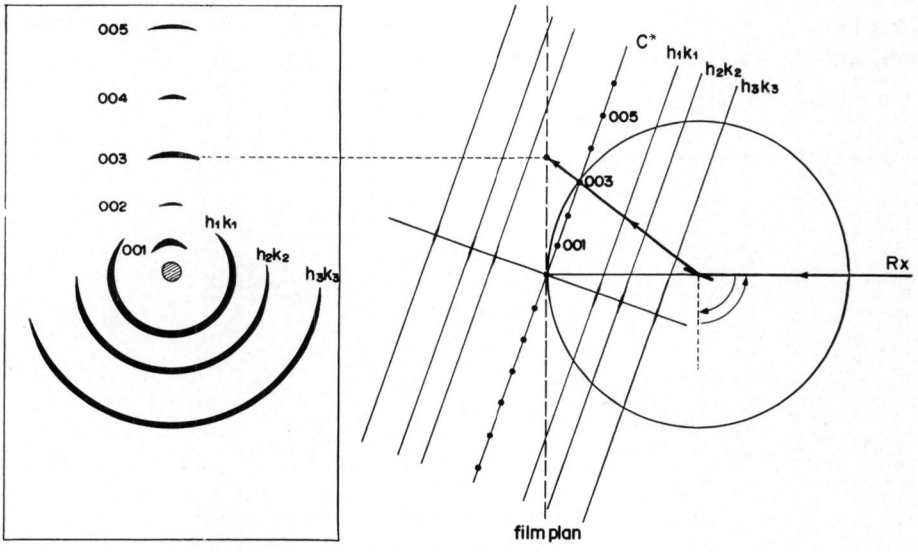


FIG. 15. — *Formation du diagramme de diffraction X d'une plaquette oscillant de* 0 *à* $\frac{\pi}{2}$ *dans le faisceau de rayons X*

(1) Nous exprimons les angles en radians. O signifie que le faisceau de rayons X est dans le plan de la plaquette, $\frac{\pi}{2}$ qu'il lui est perpendiculaire.

2. 1.2. *Oscillations de* $\frac{\pi}{4}$ *à* $\frac{3\pi}{4}$.

On voit sur la figure 16 que l'on observe dans ce cas que les bandes *hk*, à l'exclusion des raies 001.

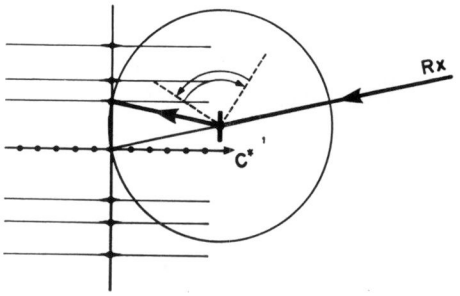


FIG. 16. — *Formation de diagramme de diffraction X d'une plaquette oscillant de* $\frac{\pi}{4}$ *à* $\frac{3\pi}{4}$ *dans le faisceau de rayons X*

2. 2. *Rotation de la plaquette autour d'un axe parallèle à c*.*

Si l'on se reporte à la figure 14, on voit que toutes les lignes réciproques de mêmes indices *hk* traversent la sphère d'Ewald de manière identique lorsque l'échantillon fait un tour complet sur lui-même. Leur trace sur la sphère d'Ewald correspond à l'intersection d'un cylindre avec cette sphère (fig. 17).

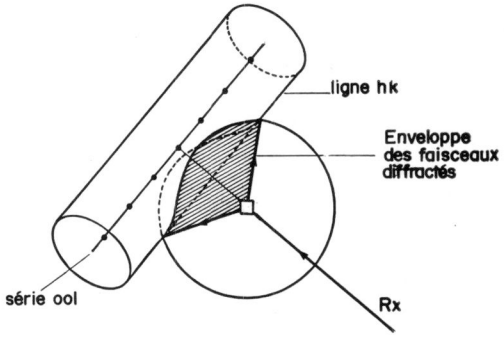


FIG. 17. — *Formation du diagramme de diffraction X d'une plaquette tournant dans le faisceau de rayons X autour d'un axe parallèle à c**

Cette situation est particulièrement propice à l'observation de la distribution des intensités le long des lignes *hk*. En effet, s'il n'y a pas de modulation, nous avons vu précédemment que le facteur de structure possède une valeur maximum au niveau du nœud *hk*o et que cette valeur décroît rapidement le long de la ligne *hk* correspondante ; le diagramme de diffraction X présentera donc une série unique de taches

plus ou moins étalées sur un axe perpendiculaire à l'axe de rotation (fig. 18 *a*). Si, par contre, une modulation le long des lignes *hk* se traduit par une série de maxima du facteur de structure, le diagramme de diffraction X présentera une série de maxima secondaires, de part et d'autre de la perpendiculaire à l'axe de rotation (fig. 18 *b*). On observe aussi généralement la trace des raies 00*l* sur l'axe perpendiculaire au précédent.

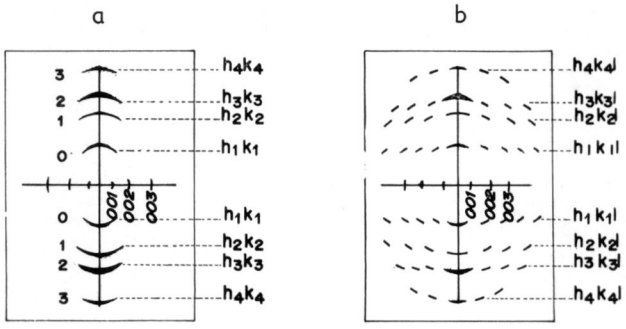


FIG. 18. — *Diagramme de diffraction X d'une plaquette tournant autour d'un axe parallèle à la direction c**

a) plaquette formée de cristallites turbostratiques
b) plaquette formée de cristallites tridimensionnels

B. — *Diffraction électronique*

La manière la plus simple de préparer les échantillons consiste à laisser évaporer, sur une grille de microscope électronique, une goutte d'une suspension très diluée de l'argile que l'on désire étudier ; de cette manière, les particules élémentaires se déposent, en gros, parallèlement au plan de la grille.

L'observation en microscopie électronique permet, en premier lieu, d'étudier la morphologie des particules et de choisir les cristallites les mieux adaptés à la micro-diffraction (par exemple, pour leur finesse et leur planéité). Sur les microscopes modernes, le passage microscopie-micro-diffraction est instantané et l'on peut observer le diagramme de diffraction sur un écran fluorescent ou obtenir un cliché photographique.

Comme nous l'avons souligné plus haut, l'avantage essentiel de cette technique est de permettre l'étude de particules de très petites dimensions, voire de particules monocristallines dans le cas des argiles.

Étant donné que le faisceau d'électrons est perpendiculaire au plan des feuillets élémentaires, donc orienté suivant la direction *c**, on observe l'intersection des lignes réciproques *hk* avec le plan tangent à la sphère d'Ewald au point où le faisceau incident atteint le film photographique (fig. 19). Le cliché présente une série de taches correspondant à ces intersections. Comme la sphère d'Ewald a un très grand rayon, en raison de la courte longueur d'onde du faisceau d'électrons, et que l'on reste au voisinage de l'origine du réseau réciproque, le plan est pratiquement confondu avec la sphère, et l'on visualise le réseau réciproque, pratiquement sans déformation.

On voit, que, de cette manière, il est aisé d'étudier la répartition des lignes réciproques *hk* dans l'espace. En particulier, l'ordre de superposition des feuillets élémentaires d'un cristallite est clairement révélé par la distribution des taches sur

le cliché. Pour une superposition parfaite des feuillets, on obtient une série unique de taches, dont chacune correspond à la superposition des lignes de chaque feuillet ayant le même couple d'indices *hk*. Dans le cas du désordre turbostratique, les taches sont réparties au hasard selon une série de cercles concentriques (fig. 9) (GARD, 1971 ; ZVYAGIN, 1967 ; OBERLIN et MERING, 1962).

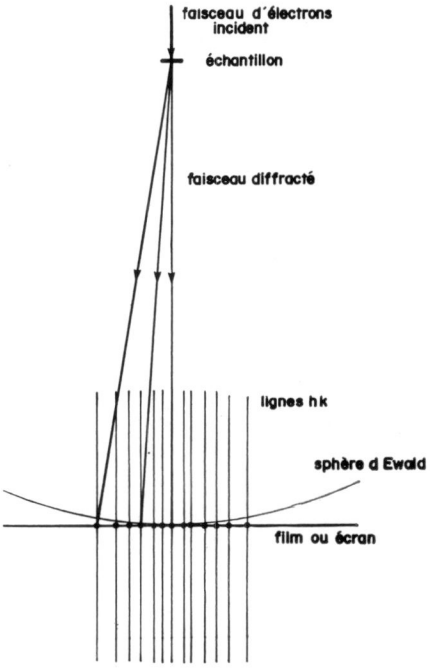


FIG. 19. — *Formation du diagramme de microdiffraction électronique d'un cristallite élémentaire de silicate phylliteux*

CONCLUSION

L'objectif de cette première partie était de décrire, d'une manière simple, la genèse des diagrammes de diffraction X par les différents types de structures atomiques rencontrées le plus fréquemment dans les minéraux cristallisés. La compréhension claire de ces données de base nous paraît présenter une importance majeure pour les études portant, par exemple, sur l'évolution des minéraux au cours des processus pédologiques, la description de leurs états de cristallinité ou l'étude au laboratoire des phénomènes d'altération.

La primauté donnée dans cet article aux aspects géométriques de l'interprétation des diagrammes de diffraction résulte de leur importance fondamentale pour l'identification et la caractérisation structurale des minéraux, mais correspond également au fait que ces aspects nous ont paru généralement beaucoup moins développés dans la littérature que les théories détaillées du calcul des structures.

Cet article peut être également considéré comme une manière d'introduction aux théories de la radiocristallographie ; nous avons donc choisi une forme d'exposé

relativement élémentaire, au risque de paraître incomplet aux yeux des spécialistes, mais avec l'espoir de rendre service au lecteur non initié. Pour une approche théorique plus directement mathématique, on se reportera par exemple aux ouvrages de BUERGER (1966), WOOLFSON (1970) et, en français, GAY (1959).

Reçu pour publication en décembre 1975.

SUMMARY

DIFFRACTION OF X-RAYS AND ELECTRONS BY ATOMIC LATTICES :
APPLICATION TO THE STUDY OF CRYSTAL ORDER IN CLAY MINERALS
FIRST PART : THE NATURE OF X-RAY
AND SELECTED AREA DIFFRACTION PATTERNS OF MONTMORILLONITE ;
THEIR EXPERIMENTAL OBSERVATION

In the first part of this report the principles of the diffraction of X-rays and electrons by the crystal lattices are presented on simple mathematical rules. The first chapter deals with the formation and description of the diffraction patterns of the two-dimensional and three-dimensional lattices and introduces the concept of reciprocal lattice. The second chapter concerns the observation techniques and the interpretation of the diffraction patterns of X-ray and electrons as applied to the study of clay minerals.

ZUSAMMENFASSUNG

DIFFRAKTION DER ROENTGEN
UND ELEKTRONENSTRAHLEN DURCH DIE ATOMGITTER :
ANWENDUNG AUF DIE UNTERSUCHUNG DER KRISTALLREIHENFOLGE
IN DEN TONMINERALIEN. I.

Im ersten Teil dieses Berichts werden die Prinzipien der Diffraktion der Roentgen und Elektronenstrahlen durch die Kristallgitter auf einfache mathematischen Grundlagen vorgestellt. Der erste Kapitel betrifft die Bildung und die Beschreibung der Diffraktionsdiagramme von den zweidimensionalen und dreidimensionalen Gitter und die Einführung des Begriffs des wechselseitigen Gitters. Der zweite Kapitel ist den Beobachtungstechniken und der Deutung der Diagramme der Roentgen und Elektronen-diffraktion unter dem Gesichtspunkt ihrer Anwendung auf die Untersuchung der Tonmineralien gewidmet.

РЕЗЮМЕ

Явления диффракции рентгеновского и электронного излучений атомическими сетками; применение к изучению кристаллического порядка в глинистых минералах. — I. Натура диаграмм диффракции этих излучений глинистыми минералами; экспериментальные наблюдения над этими явлениями.

Ж. МАМИ.

В первой части данной работы, на простых математических основах, представлены принципы преломления рентгеновского и электронного излучений в кристаллических сетках. В первой главе описываются принципы составления диаграмм двухмерных и трехмерных сеток, а также и интродукция понятия обратной сетки. Вторая глава посвящена описанию технологии наблюдений и интерпретации диаграмм преломления рентгеновских и электронных излучений, в применении к изучению глинистых минералов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bragg W. L., 1913. The reflection of X rays by crystals. *Proc. Roy. Soc. London A*, **88**, 428-438.

Brindley G. W., Mering J., 1951. Diffraction des rayons X par les structures en couches désordonnées. *Acta cryst.*, **4**, 441-447.

Buerger M. J., 1960. *Crystal structure analysis.* John Wiley and Sons, New York, 668 p.

Buerger M. J., 1966. X-ray crystallography. John Wiley and Sons, New York, 7e édition, 531 p.

Ewald P. P., 1921. Das « reziproke Gitter » in der Strukturtheorie. *Zeitschr. f. Kristallographie*, **56**, 129-156.

Gard J. A., 1971. *The electron optical investigation of clays.* Mineralogical Society, London, 383 p.

Gatineau L. *et al.*, 1972. Structures lamellaires : méthodes d'étude de leurs imperfections. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.*, **95**, 713-721.

Gay R., 1959. *Cours de cristallographie. Radiocristallographie théorique*, **3**, Gauthier-Villars, Paris, 278 p.

Guinier A., 1956. *Théorie et technique de la radiocristallographie.* Dunod, Paris, 736 p.

International tables for X-ray crystallography, 1952. 3 volumes, Kynoch Press, Birmingham, England.

Laue M. V., 1932. Kreuzgitterspektren. *Z. Kristallog.*, **82**, 127-141.

Longuet-Escard J. *et al.*, 1961. Étude des profils des bandes de diffraction dans la montmorillonite. *Congrès int. géol.*, Copenhague, session 21, 17-27.

Lipson H., Cochran W., 1957. *The determination of crystal structures.* Bell and Sons, London, 345 p.

Mering J., 1949. L'interférence des rayons X dans les systèmes à stratification désordonnée. *Acta cryst.*, **2**, 371-377.

Oberlin A., Mering J., 1962. Observations en microscopie et microdiffraction électroniques sur la montmorillonite Na. *J. microscopie*, **1**, 107-120.

Vainshtein B. K., 1964. *Structure analysis by electron diffraction.* Pergamon Press, New York, 420 p.

Warren B. E., 1941. X-ray diffraction in random layer lattices. *Physical Review.*, **59** (9), 693-698.

Wilson A. J. C., 1949. X-ray diffraction by random layers : ideal line profiles and determination of structure amplitudes from observed line profiles. *Acta cryst.*, **2**, 245-251.

Woolfson M. M., 1970. *An Introduction to X-ray crystallography.* Cambridge University Press, 380 p.

Zvyagin B. B., 1967. *Electron diffraction analysis of clay mineral structures.* Plenum Press, New York, 364 p.

Ann. agron., 1975, **26** (6), 651-669.

DESSÈCHEMENT ET RÉHUMECTATION DES PÂTES ARGILEUSES : UNIFICATION DES RÉSULTATS

J. DE CRÉCY
avec la collaboration technique de J. ANDRÉ

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques Antilles-Guyanne, I. N. R. A.,
Domaine Duclos,
97170 Petit-Bourg

RÉSUMÉ

Il est habituel de déterminer les caractéristiques hydriques (courbes humidité-pF) avec des sols séchés à l'air et tamisés.

Dans cette étude, les sols sont utilisés sous forme de pâte argileuse à la limite de liquidité, et l'humidité est exprimée sous la forme d'un rapport entre l'indice des vides et celui qui correspond à la limite de liquidité, soit :

$$e' = \frac{e}{e\text{WL}} \times 100 = \frac{\text{W}}{\text{WL}} \times 100.$$

Les courbes e'/pF, réalisées au moyen d'une méthode osmotique, concernent tant la phase de dessèchement que de réhumectation, faisant apparaître nettement l'effet d'hystérésis.

L'ensemble des résultats expérimentaux peut se représenter par une équation du type suivant :

$$e' = \text{Zd}\ [18{,}7 + \text{A}(\text{Zr} - 5)]$$

où { Zd = 7-pF atteint au dessèchement,
Zr = 7-pF à la réhumectation,
A = paramètre qui prend une valeur d'autant plus élevée que les argiles sont actives (variation totale de 0 à 3,74).

Équation qui se réduit à :

$$e' = \text{Zd}\ [18{,}7 + \text{A}(\text{Zd} - 5)]$$

pour la seule phase de dessèchement.

Ces deux expressions acquièrent une portée très générale en raison de la diversité des sols expérimentés et des types d'argiles, et traduisent l'identité du processus pour chacune des phases.

Cette équation reste valable tant que les pâtes sont saturées, c'est-à-dire, tant que la limite de retrait n'est pas atteinte.

Par ailleurs, la comparaison de nos résultats avec des essais de compression montre qu'il s'agirait pour les sols saturés et consolidés de phénomènes semblables sinon identiques.

INTRODUCTION

L'étude des relations entre le sol et l'eau s'accompagne d'une mesure des forces globales de rétention, qu'il est convenu d'exprimer en centimètres de hauteur d'eau, et par commodité, par le pF qui en est le logarithme décimal.

Il est d'usage courant, sinon protocolaire, de mesurer le pF sur un sol séché à l'air, tamisé à 2 mm et homogénéisé.

Cependant, l'état de ce matériau présente de nombreux inconvénients du fait qu'un certain nombre de facteurs extérieurs à la mesure viennent modifier les résultats.

En effet, il s'est avéré que pour le sol séché à l'air, il fallait tenir compte de la structure héritée et des conditions de dessèchement (MONNIER, 1968), du mode de réhumectation, du degré de tassement et de malaxage (PÉRIGAUX, 1963 et auteurs cités).

Nous avons préféré choisir un état du matériau moins sujet à des modifications aléatoires. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé des pâtes argileuses à la limite de liquidité d'Atterberg.

La reproductibilité s'en trouve facilitée, car la limite de liquidité est une humidité caractéristique d'un état physique bien déterminé.

Nous espérons ainsi, en supprimant des variations difficilement mesurables, mettre en évidence des déterminismes que nous chercherons à unifier.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

A. — *Matériel expérimental*

Nous avons sélectionné cinq types de sol aussi différents que possible pour conférer aux expérimentations le plus grand caractère de généralité (tabl. I *a*, *b*, *c*).

TABLEAU I *a*

Caractéristiques physiques des sols étudiés

N°	Type de sol	WL	WP	IP	WR
1	Sol brun calcaire de surface (Dijon)	46,6	22,4	24,2	10,0
2	Sol ferrallitique (15-25 cm) (Guadeloupe)	90,0	42,0	48,0	20,0
3	Ferrisol de surface (Cuba)	65,0	30,4	34,6	19,2
4	Vertisol de surface (Guadeloupe)	104,5	36,5	68,0	11,4
5	Vertisol de profondeur (Guadeloupe).....	124,6	32,3	92,3	12,0

WL : Limite de liquidité WP : Limite de plasticité
IP : Indice de plasticité WR : Limite de retrait

TABLEAU I *b*

Caractéristiques physico-chimiques

Déterminations	N° des sols				
	1	2	3	4	5
Granulométrie :					
Argile (0-2 μ)	37,4	52,2	54,5	64,0	88,0
Limons (2-50 μ)	45,1	30,3	39,0	29,4	9,0
Sables (50-2 000 μ).....	17,5	17,5	6,5	6,6	3,0
Matière organique (%)	1,9	1,3	2,2	6,9	0,8
pH (eau)	8,0	4,4	6,3	7,8	8,0
Capacité d'échange (CE) (me/100 g)	20,3	14,8	12,9	42,6	38,7
Cations échangeables (me/100 g) :					
Ca	Sat	3,10	9,00	Sat	Sat
Mg	0,67	0,55	1,17	4,29	7,47
K	0,56	0,12	0,76	0,98	0,37
Na	0,06	0,21	0,05	0,36	2,05
CE/Arg. (%)	0,54	0,28	0,24	0,67	0,44
IP/Arg. (%)	0,65	0,92	0,64	1,06	1,05

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire d'analyses I. N. R. A. (Arras).

TABLEAU I *c*

Déterminations minéralogiques aux RX

N° des sols	Gi	Kc	Méta H	I alt.	^{14}M-^{14}V	M
1		2		2	6	
2			10			
3	+	7			3	
4		0,5				9,5
5		1			1	8

Gi = Gibbsite (+ = traces)
Kc = Kaolinite (+ traces de chlorite)
Méta H = Métahalloysite
I alt. = Illite altérée
^{14}M-^{14}V = Interstratifié montmorillonite-vermiculite
M = Montmorillonite.

Les analyses minéralogiques ont été effectuées au laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg (H. PAQUET).

B. — *Techniques analytiques*

Les limites d'Atterberg ont été déterminées suivant les normes ASTM en usage dans les laboratoires routiers.

Nous rappelons que les limites d'Atterberg sont des humidités caractéristiques des états physiques des pâtes :

— la limite de liquidité WL qui sépare l'état liquide de l'état plastique ;
— la limite de plasticité WP qui sépare l'état plastique de l'état semi-solide susceptible de rupture à la déformation ;
— la limite de retrait WR qui sépare l'état saturé d'eau de l'état non saturé, par introduction d'air en fin de dessèchement, ce qui correspond à une limite de rétraction du sol.

La limite de liquidité a été déterminée en construisant la droite humidité/log N avec au moins cinq points de mesure. La variabilité des sols n'a pas permis en effet d'utiliser la méthode du point unique avec toute la sécurité désirable.

Mesure du pF.

Nous avons choisi une méthode qui permette de dessécher les pâtes par voie humide pour rester assuré d'une saturation complète par l'eau en évitant toute entrée d'air.

Celle de WALDRON et MANBEIAN (1970) a paru convenir le mieux aux conditions de nos expérimentations.

C'est une méthode de détermination du pF par osmose avec des solutions étalonnées de polyéthylène glycol 6000 dans l'eau. La pâte est introduite dans un tube de dialyse et celui-ci est plongé dans une solution de PEG dont la concentration correspond à un pF donné (tabl. 2). Cette méthode peut être utilisée entre pF 2,1 et pF 4,4 environ. Nous avons choisi une gamme depuis pF 2,1 jusqu'à 4,2, avec des écarts réguliers de 0,3 unité pF.

TABLEAU 2

Caractéristiques des solutions aqueuses de polyéthylène glycol 6000 utilisées

pF	Concentration en g/l de solution	Indice de réfraction (30°C)
2,1	29	1,3360
2,4	44	1,3376
2,7	64	1,3404
3,0	92	1,3440
3,3	133	1,3496
3,6	187	1,3568
3,9	259	1,3668
4,2	346	1,3783

Pour vérifier et corriger éventuellement les taux de concentration en PEG, nous avons, en complément de la méthode, établi une correspondance entre celles-ci et l'indice de réfraction. On peut ainsi détecter commodément les variations entraînées tant par l'évaporation que par les échanges d'eau entre la pâte et les solutions de PEG.

Mode opératoire

Pour la phase de dessèchement, les pâtes, portées à une humidité légèrement supérieure à la limite de liquidité sont introduites dans les tubes de dialyse et plongées dans la solution qui correspond à pF 2,1 qui est le premier de la gamme. Nous avons vérifié que l'équilibre osmotique était

atteint en 48 heures, mais pour les sols très argileux et très plastiques, il est préférable d'attendre par précaution une soixantaine d'heures.

Le tube de dialyse est alors retiré, soigneusement essuyé et pesé. Puis on passe successivement de la même manière à toute la gamme des pF.

Pour la phase de réhumectation, avec la méthode osmotique, rien n'interdit de réutiliser la gamme de pF en sens inverse, puisque l'eau des solutions de PEG est susceptible de traverser la paroi du tube de dialyse dans les deux sens jusqu'à l'équilibre des tensions de part et d'autre.

Mode de représentation des résultats

Les courbes d'humidité/pF sont souvent représentées en utilisant l'humidité volumique de préférence à l'humidité pondérale pour y inclure plus directement la notion de porosité. Mais la porosité se traduit par une expression complexe, dans le sens où le volume des vides se rapporte au volume total, lequel est la somme du volume du solide et du volume des vides. La variation de la porosité en fonction du volume des vides s'exprime par une hyperbole.

L'indice des vides, couramment employé en mécanique des sols, est une expression simple : c'est le rapport entre le volume des vides et le volume du solide. *Dans le cas d'un sol saturé,* nous avons :

$$e = W \cdot \gamma_s$$

e = Indice des vides,
γ_s = Densité réelle du solide,
W = Humidité pondérale exprimée par rapport à l'unité.

Ainsi, l'indice des vides, dans le cas de saturation, est-il le produit *de l'humidité par la masse spécifique du solide.*

Si nous rapportons l'indice des vides à celui qui correspond à la limite de liquidité, nous avons affaire à un taux d'indice des vides relatifs à celui de la WL, ou plus simplement ce que nous appellerons dans la suite du texte, *au taux relatif des vides* (e') exprimé en pourcentage. Ainsi le taux relatif des vides se traduit-il, en définitive, par le rapport de l'humidité pondérale à la WL :

$$e' = \frac{e}{e\mathrm{WL}} \times 100 = \frac{\gamma_s \cdot W}{\gamma_s \cdot \mathrm{WL}} \times 100 = \frac{W}{\mathrm{WL}} \times 100.$$

Ce mode de représentation permet de se référer non seulement à un taux d'humidité spécifique, mais également à un état physique constant pour chacun des sols (WL), tout en restant un rapport volumique.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats expérimentaux bruts ont été portés dans les tableaux 3 *a* et 3 *b*.

Exprimés en taux relatifs des vides (e'), ils ont été représentés sur la figure 1 (*a* et *b*) pour la phase de dessèchement et sur la figure 2 (*a* et *b*) pour la phase de réhumectation. Nous rappelons que les dessèchements ont été effectués de pF 2,1 à pF 4,2, et pour l'ensemble des pâtes, la réhumectation a été effectuée par inversion (soit de pF 4,2 à pF 2,1) ; en ce qui concerne la pâte n° 2, nous avons, en supplément, procédé à un dessèchement de pF 2,1 à 3,9 et à une réhumectation de pF 3,9 à 2,1. Dans tous les cas, le phénomène d'hystérésis apparaît nettement.

Le phénomène d'hystérésis est défini d'une manière générale comme un retard sur l'effet d'une action, quand celle-ci est appliquée en sens inverse.

Dans le cas qui nous occupe, pour un même pF appliqué, on ne retrouve pas la totalité de l'eau retenue après avoir réhumecté un sol préalablement soumis à la dessiccation.

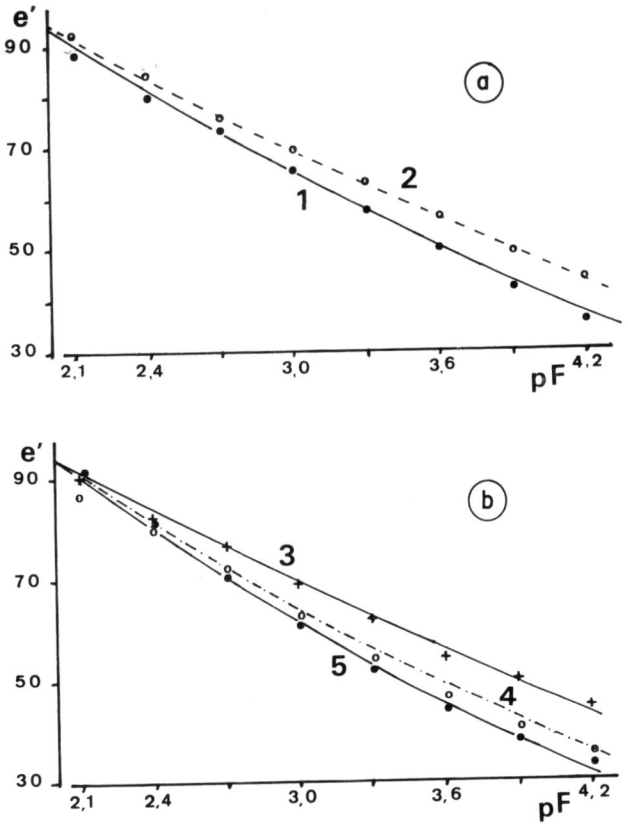


FIG. 1. — *Relations entre l'indice relatif des vides (e') et le* pF, *en phase de dessèchement, pour 5 types de sols*

(Les traits représentent les valeurs théoriques ; les points, les résultats expérimentaux)

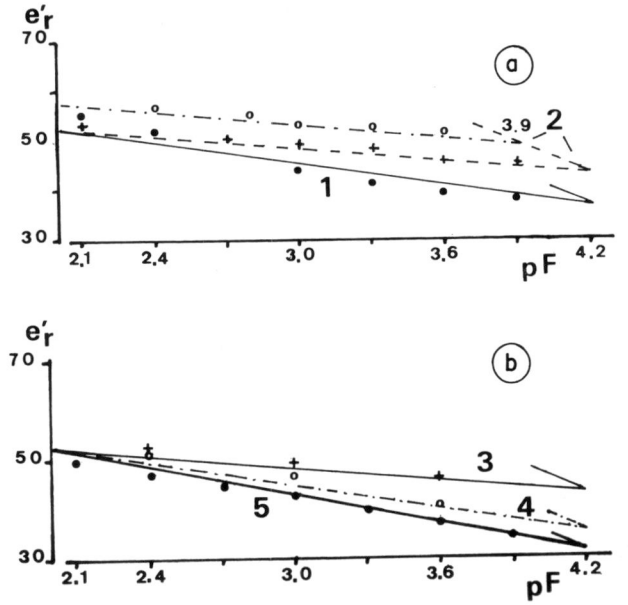


FIG. 2. — *Relations entre l'indice relatif des vides (e') et le* pF, *en phase de réhumectation, pour 5 types de sols*

TABLEAU 3 *a*

Humidités pondérales des pâtes au dessèchement

N° pâte	pF							
	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2
1	41,2	37,3	34,4	30,5	26,8	23,3	19,7	16,5
2	82,8	76,6	68,0	62,7	57,1	50,9	44,6	40,0
3	58,9	53,7	50,0	45,0	40,7	35,7	33,1	29,3
4	91,0	84,4	75,5	65,4	57,4	48,1	42,4	37,1
5	113,0	101,1	88,0	76,5	65,3	55,9	47,3	41,6

TABLEAU 3 *b*

Humidités pondérales des pâtes à la réhumectation après dessèchement à pF *4,2 et* pF *3,9* (2*)

N° pâte	pF						
	3,9	3,6	3,3	3,0	2,7	2,4	2,1
1	17,8	18,5	19,5	20,6	—	24,3	25,7
2	40,8	42,3	43,5	44,6	45,5	46,3	47,7
2*	—	46,7	47,2	47,9	49,9	57,2	—
3	—	31,1	—	32,2	—	33,8	—
4	—	42,6	—	48,6	—	53,5	—
5	42,4	46,0	49,1	53,8	56,1	58,6	61,3

A. — *Expression mathématique des courbes e'*/pF (phase de dessèchement)

Nous constatons que si, pour certaines pâtes (2 et 3), les points semblent s'aligner selon une droite, il n'en est pas de même pour les autres qui accusent une courbure manifeste.

La régularité des données suggère la possibilité d'une expression mathématique. Toutefois, il faut tenir compte du fait que les dessèchements obtenus correspondent au maximum à pF 4,2, laissant ainsi une incertitude au-delà de ce pF.

Nous pouvons disposer d'une donnée limite supplémentaire et théoriquement

applicable à toutes les courbes. En effet, quand l'humidité devient nulle, le pF vaut alors pratiquement 7, soit environ 10 000 bars.

En admettant la régularité des courbes de telle sorte que $e' = 0$ quand $pF = 7$, nous ajoutons une donnée de plus aux résultats expérimentaux.

Nous allons examiner si les données sont compatibles avec une équation du type suivant :

$$e' = aZ^2 + bZ \qquad (1)$$

où $Z = 7 - pF$, et qui satisfait à l'annulation de e' quand $Z = 0$ (soit $pF = 7$).

Pour chaque courbe de dessèchement, a et b ont été déterminés par régression multiple à deux variables (tabl. 4).

TABLEAU 4

Détermination des coefficients a *et* b

	Numéro des pâtes				
	1	2	3	4	5
a	2,43	1,45	1,24	2,71	3,41
b	6,40	11,62	12,35	4,78	1,75
r ($n = 9$)	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999

Le coefficient de corrélation r s'applique à la régression entre les valeurs réelles et calculées au moyen de l'équation (1), de e' en fonction de Z. Pour chaque courbe, on dispose de 8 points expérimentaux (qui sont, par ailleurs, la moyenne de 5 à 6 répétitions), et d'un point supplémentaire pour lequel on admet les coordonnées $e' = 0$, $Z = 0$.

Les valeurs élevées du coefficient de corrélation indiquent que les courbes expérimentales répondent de façon satisfaisante à l'équation (1) proposée.

En examinant le tableau 4, il semble qu'il y ait un effet de compensation entre les valeurs de a et b. En les portant sur un graphique, on constate en effet qu'elles sont liées linéairement. Un calcul de corrélation pour les cinq couples de valeurs donne la relation suivante :

$$b = 18{,}68 - 5{,}04\,a\,; \qquad r = 0{,}999\,; \qquad n = 5$$

et en arrondissant : $b = 18{,}7 - 5\,a$.

L'effet de compensation existe bien, et nous sommes dès lors autorisés à remplacer b par sa valeur dans l'équation (1) :

$$e' = aZ + (18{,}7 - 5a)\,Z$$

soit :

$$e' = Z\,[18{,}7 + a(Z - 5)] \qquad (2)$$

Ainsi les courbes e'/pF ne dépendent-elles plus que d'un paramètre (a) et de différentes constantes.

Pour ne pas introduire de confusion de lecture, nous désignerons ce paramètre par un A majuscule.

Il faut toutefois remarquer que la détermination de A doit résulter d'essais assez nombreux et requiert en principe la connaissance de l'ensemble des courbes e' — pF pour obtenir une précision acceptable, car les variations dues aux pesées et aux manipulations ont une incidence importante sur le calcul de A. En effet, un écart de 1 p. 100 sur e' entraîne une forte variation de A.

Par exemple :

$$\text{Pour} \begin{cases} e' = 60 \text{ à pF } 3 & A = 3{,}7 \\ e' = 61 \text{ à pF } 3 & A = 3{,}45 \end{cases}$$

La précision est donc d'autant moins bonne que les limites de liquidité sont plus basses, car les calculs concernent des humidités qui sont ensuite rapportées à la WL. Il s'agit donc d'une détermination de type statistique.

B. — *Conséquences entraînées par l'équation* (2) *des courbes* e'/pF

1. *Valeurs communes de* e' *à* pF 2.

Dans l'équation (2), quand Z = 5, soit pF = 2, nous avons, quels que soient les sols expérimentés :

$$e' = \frac{W}{WL} = 18{,}7 \times 5 = 93{,}5$$

d'où WL = p. 100 d'humidité à pF 2 × 1,069.

Ainsi suffirait-il de mesurer avec une méthode appropriée l'humidité à pF 2 d'une pâte pour en déterminer la limite de liquidité, sans passer par la méthode de la coupelle de Casagrande.

Certains auteurs (Von Shahabi, 1971) ont trouvé une très bonne corrélation entre la limite de liquidité et pF 2, mesuré par centrifugation et sur les pâtes, soit :

$$WL = 11{,}7 + 0{,}88\ W \text{ à pF } 2.$$

La présence d'un terme constant explique en partie la plus faible valeur du coefficient directeur de la droite, et par ailleurs, les résultats diffèrent sensiblement entre la méthode par centrifugation et la méthode par osmose pour les pâtes très argileuses, car la translation hydrique s'effectue moins bien par la première que par la seconde.

2. *Limites physiques de l'équation* (2).

Le paramètre A ne peut dépasser certaine valeur. En effet, quand Z = 0 (soit pF = 7), le produit A(Z — 5) ne doit pas excéder la valeur de 18,7 car il en résulterait un taux relatif des vides (e') négatif, ce qui, d'une part est physiquement impossible, et ensuite, en contradiction avec l'annulation de e' à pF 7.

La valeur maximale de A sera donc 18,7 : 5 = 3,74.

3. *Calcul du* pF *des limites d'Atterberg.*

Une fois connue la valeur de A, on peut facilement calculer le pF des différentes limites d'Atterberg, qui, pour les 5 sols expérimentés, ont été portés dans le tableau 5.

TABLEAU 5

pF *des limites d'Atterberg* (1)

N° pâte	WL	pF	WP	pF	WR	pF
1	46,6	1,79	22,4	3,70	10,0	5,09
2	90,0	1,75	42,0	4,04	20,0	5,38
3	65,0	1,74	30,4	4,10	19,2	5,02
4	104,5	1,80	36,5	4,24	11,4	5,73
5	124,6	1,82	32,3	4,47	12,0	5,54

(1) Correspondances établies au moyen de l'équation (2).

Pour les pâtes expérimentées, les dessèchements effectués jusqu'à pF 4,2 se situent tous au-dessus de la limite de retrait. En principe, et suivant les travaux de HAINES (1923), le volume de retrait doit être égal au volume d'eau soustraite par succion, et à la réhumectation, le phénomène d'hystérésis a lieu sans introduction d'air. Il faut donc attribuer à ce phénomène, dans les pâtes, une autre cause que le piégeage d'air.

4. *Relations entre le paramètre A et la nature des argiles.*

Les sols n° 2 et n° 3 sont à base de kaolinite, le sol n° 1 d'illite et les n° 4 et 5 de montmorillonite (cf. tabl. 1 *c*). On peut constater une progression des valeurs de A dans le sens de l'activité des argiles, de 1,24 à 3,41.

Une étude complémentaire dont nous ne donnerons ici que les résultats qui se rapportent à notre sujet, nous a montré que le paramètre A n'était pas affecté par des mélanges binaires avec des doses croissantes de sable (tabl. 6), mais qu'il variait dans les cas de mélange d'argiles différentes.

Les écarts entre les différentes valeurs de e' en cas de mélange et celle de la pâte n° 5 sans mélange ne sont pas significatifs. Les valeurs de A peuvent donc être considérées comme constantes. Dans le tableau 7, les écarts entre les différentes valeurs de e' sont significatifs, et correspondent à une variation des valeurs de A.

On constate d'ailleurs que ces variations ne sont pas proportionnelles aux taux de mélange, l'influence du vertisol restant prépondérante même au-delà de 50 p. 100.

Ceci pour situer la véritable signification de ce paramètre, et dans quel sens il serait nécessaire de le considérer.

TABLEAU 6

Valeurs de e′ à pF *3 pour des mélanges binaires*
(pâte n° 5 avec des doses croissantes de sable)

Sable ajouté (%)	WL	WP	W à pF 3	*e′* à pF 3
0	124,6	32,3	76,2	61,2
4,7	116,5	30,5	71,4	61,1
9,1	108,0	29,2	67,3	62,3
16,7	95,7	24,0	58,6	61,2
50,0	60,6	16,2	37,8	62,3
60,0	46,5	15,0	28,8	62,0
71,5	35,5	15,0	21,2	59,7

TABLEAU 7

Valeurs A. Mélange des pâtes n° 5 et n° 2
(Vertisol. Sol ferrallitique)

N° 5 (%)	N° 2 (%)	WL	WP	W à pF 3,65	*e′* pF 3,65	A
100	0	124,6	32,3	54,6	43,8	3,41
50	50	110,8	35,2	50,6	45,7	3,06
30	70	106,2	39,0	50,0	47,1	2,81
0	100	90,0	42,0	49,1	54,6	1,45

5. *Interprétation de l'équation* (2).

Reprenons l'équation en question :

$$e' = Z\,[18{,}7 + A(Z - 5)] \qquad (2)$$

Nous avons déjà signalé que lorsque Z = 5, c'est-à-dire lorsque pF = 2, le taux relatif des vides *e′* a la même valeur pour tous les sols. Le pF 2 apparaît donc comme pF « privilégié » ; en tenant compte de ce fait, si nous substituons à Z une valeur F telle que F = pF — 2, nous aurons, après transformation de l'équation (2) :

$$e' = \underset{\text{I}}{[93{,}5 - 18{,}7\,F]} - \underset{\text{II}}{[A.F(5 - F)]} \qquad (2\ bis)$$

— Le terme I est linéaire et exprime que, dans tous les cas, e' diminue régulièrement de 18,7 p. 100 par unité de pF à partir d'une valeur constante de 93,5 à pF 2.

— Le terme II est toujours positif ou nul, car F varie de 0 à 5, c'est-à-dire, entre pF 2 et pF 7. Le terme II précédé du signe moins, traduit par conséquence une diminution supplémentaire dans tous les cas.

L'importance de cette diminution n'est pas linéaire, le terme A.F(5 — F) est une parabole dont l'axe de symétrie passe par la valeur F = 2,5, soit pF 4,5.

Le pF 4,5 apparaît, après pF 2, comme critique, c'est-à-dire, *que c'est à* pF 4,5 *que l'effet du paramètre A devient maximum.*

Si l'on admet que, par toute humidité supérieure à la limite de retrait, toute cession d'eau dans les pâtes s'accompagne d'un retrait égal en volume, nous aurions au cours du dessèchement :

— d'une part, une contraction de la pâte correspondant à un phénomène irréversible, c'est-à-dire à une déformation permanente sous contrainte qui est le propre des corps plastiques ;

— d'autre part, l'équivalent d'une compression sur un corps avec réversibilité du phénomène.

C. — *Application au phénomène d'hystérésis*

1. *Unification des résultats.*

Le phénomène d'hystérésis constaté expérimentalement ne fait que traduire, à la réhumectation, la réversibilité de la « compression » dont l'ampleur est pondérée par l'irréversibilité de la « contraction », au niveau atteint au cours du dessèchement.

En réalité, si, à la réhumectation, le taux relatif des vides est inférieur à celui qui est constaté au dessèchement — pour le même pF — c'est que la façon dont on mène l'expérience ne correspond pas véritablement à un « aller-retour ».

En effet, au dessèchement, on provoque une succion de plus en plus forte. A la réhumectation, le potentiel correspond toujours à une succion, mais de moins en moins forte, en présence d'eau. *Cependant, il n'a pas changé de signe.* Autrement dit, pour espérer obtenir une réciprocité, il faudrait qu'en retour, on applique une *pression* d'eau égale à la succion exercée pour amener le sol à un dessèchement donné.

En conséquence, un sol inerte, ou totalement plastique, devient théoriquement non réhumectable. En effet, seule la partie réversible du système reste sensible à une décompression, traduite par une succion moins forte.

Si cette interprétation est correcte, nous proposons de compléter l'équation (2) en fonction de ce qui vient d'être exposé, pour qu'elle puisse s'appliquer aussi à la phase de réhumectation des pâtes :

$$e'r = \mathrm{Zd}\,[18{,}7 + \mathrm{A}(\mathrm{Zr} - 5)] \qquad (3)$$

$e'r$ = taux relatif des vides à la réhumectation,
Zd = valeur de Z au dessèchement maximum atteint,
Zr = valeur de Z appliquée à la réhumectation,

ou encore en utilisant F (soit F = pF — 2)

$$e'r = [93{,}5 - 18{,}7\ \mathrm{Fd}] - [\mathrm{A.Fr}(5 - \mathrm{Fd})] \qquad (3\ bis)$$

Si nous comparons les résultats théoriques, calculés avec les équations 3 ou 3 *bis* proposées et les données expérimentales, nous constatons un très bon accord (cf. fig. 1 (*a* et *b*) et 2 (*a* et *b*)). Les traits pleins correspondent aux calculs et les points aux résultats expérimentaux.

Cette conformité est en faveur de notre hypothèse.

Elle est illustrée par la figure 3, qui en exprime le modèle théorique.

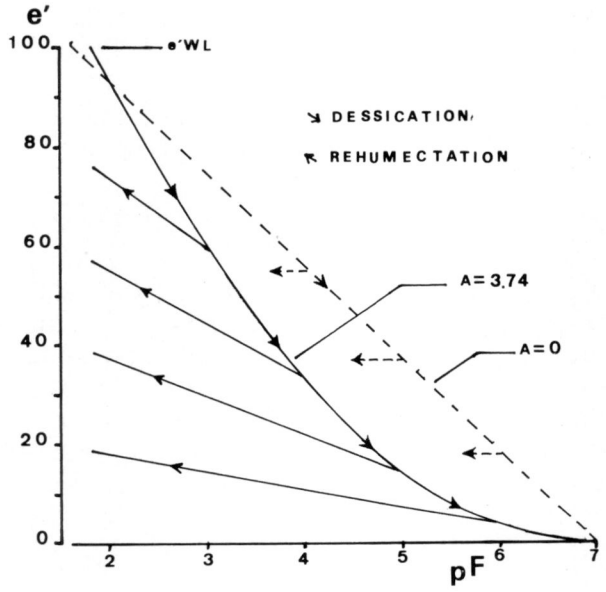


FIG. 3. — *Illustration du modèle théorique*

2. *Généralisation.*

Si on substitue à l'équation (3) une équation plus générale de la forme suivante :

$$e' = q\ \mathrm{Zd}$$

où $q = 18{,}7\ [1 - K(5 - Zr)]$ et $K = A : 18{,}7$,

on peut comparer les valeurs de q à un binôme de compression où K serait un coefficient de compressibilité, analogue à un coefficient de dilatation sous l'effet d'une différence dé température, alors qu'il s'agit ici de différence de pression à l'échelle logarithmique.

La valeur maximale du coefficient K ne peut dépasser 0,2, soit 3,74/18,7.

Cette compressibilité agissant sur la capacité de fixation d'eau est réversible en fonction de la différence des pressions logarithmiques, mais elle est insérée dans un système irréversible, dépendant lui-même des tensions appliquées ; elle ne joue, pour ainsi dire, *que dans la marge qui lui reste.*

Pour mieux fixer les idées, comparons arbitrairement e' à une surface qui serait le produit de deux côtés de valeurs q et Zd (fig. 4) :

— avant dessiccation, e' est égal à l'aire déterminée par ABCD : soit e' (1) ;

— en cours de dessiccation, Zd diminue de Zd à Zd', et comme q dépend en partie de la différence Zd — Zd', il diminue de CD en CH = q', et la surface est représentée par EFHC = e' (2).

Quand la réhumectation totale a lieu, Zd′ reste au niveau atteint tandis que q' reprend la valeur de départ. La surface s'augmente de l'aire FGDH et a pour aire totale EGDC, soit $e'(2) + e'(3) = e'r$.

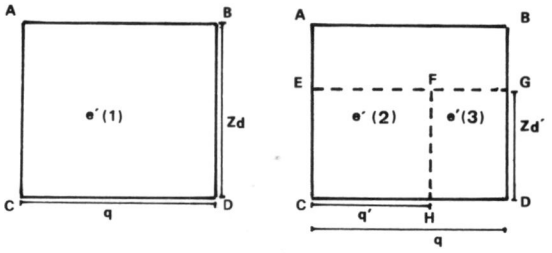


FIG. 4. — *Représentation schématique de e′:* avant dessiccation (1) ; en cours de dessiccation (2) et après réhumectation totale (3)

Tout se passe comme si la diminution de la surface provenait de la diminution conjointe de deux dimensions, tandis que l'augmentation de cette surface ne s'effectue que par l'augmentation d'une seule dimension, l'autre restant fixe.

Le processus qui est à l'origine de ce qu'il est convenu d'appeler hystérésis apparaît alors clairement : il n'y a réhumectation que s'il y a, pour ainsi dire, une mise en réserve d'une certaine force d'attraction au cours du dessèchement, restituée en phase de réhumectation, ce qui permet de fixer à nouveau une certaine quantité d'eau.

D. — *Comparaison avec les essais œdométriques*

En mécanique des sols, les essais de compression sont habituellement représentés par une relation entre l'indice des vides « e » et la pression exercée.

On constate que cette relation se traduit par une droite logarithmique dont la pente est négative (relation e — log p).

Le coefficient de proportionnalité est appelé indice de compressibilité. Il est défini par la formule suivante (COSTET et SANGRELAT, 1969) :

$$Cc = \frac{\Delta e}{\Delta \log p}$$

En fait, lors des essais de compression, l'indice des vides n'est pas mesuré directement, mais à partir de la mesure des tassements, en postulant l'incompressibilité des particules solides et celle de l'eau. Quand le sol est consolidé, c'est-à-dire, quand l'air a été chassé (consolidation initiale) et que l'eau intersticielle excédentaire a été éliminée (consolidation primaire), « toute diminution de volume de l'échantillon ne peut être obtenu qu'au prix d'une expulsion d'eau » (COSTET *et al.*, 1969).

Nous retrouvons là la loi de HAINES selon laquelle le retrait du sol est égal au volume d'eau perdu. Nous sommes alors dans les mêmes conditions expérimentales que lors des essais e' — pF. Cela signifie que les effets d'une dépression exercée sur l'eau retenue sont identiques à ceux d'une pression exercée sur le sol saturé.

Dans le cas des essais de compressibilité où les pressions s'étagent de 0,1 à 30 bars environ, les relations e — log p sont considérées comme des droites.

Dans le cas de caractéristiques hydriques par osmose, les relations e — pF ont été reconnues comme des courbes, bien que la courbure soit faible dans la marge de pression considérée, ceci parce qu'il nous a été possible d'extrapoler jusqu'à pF 7, soit 10 000 bars environ, au moyen d'une unification des résultats, tandis que les mesures œdométriques s'arrêtent aux pressions exercées.

L'indice de compressibilité Cc défini plus haut ne serait donc que la pente moyenne des courbes e — pF entre pF 2 et pF 4,5 par exemple, ce qui correspond à 0,1 et 32 bars.

Dans ces conditions :

$$Cc' = \frac{\Delta e}{2{,}5}$$

Pour faire une comparaison, en ordre de grandeur, entre les deux méthodes, nous disposons de la corrélation de SKEMPTON, citée par les auteurs référencés ci-dessus, selon laquelle :

$$Cc = 0{,}007\ (WL - 10)$$

et qui provient d'une comparaison entre les résultats d'essais de compression et les limites de liquidité de différents sols. Il devient alors possible de calculer pour les pâtes expérimentées ici les deux indices :

En effet si : $Cc' = \frac{\Delta e}{2{,}5}$, nous aurons :

$$Cc' = \frac{93{,}5 - e'(\text{à pF } 4{,}5)}{2{,}5 \times 100} \times \frac{\gamma_s \times WL}{100}$$

Nous obtenons le tableau 8 :

TABLEAU 8

Calcul de l'indice de compressibilité Cc *selon* (1) *la corrélation de Skempton et* (2) *la formule proposée*

N° de pâte	WL	Cc (1)	Cc' (2)
1	46,6	0,256	0,305
3	65,0	0,385	0,375
2	90,0	0,560	0,532
4	104,5	0,668	0,704
5	124,6	0,802	0,898

L'accord entre les deux modes de calcul est évident, bien que la formule de Skempton soit de nature statistique et que l'écart de 2,5 entre pF soit également une estimation de notre part.

Le fait d'assimiler les relations e — log p à des droites montre qu'il s'agit d'une approximation, car on constate (MEANS et PARCHER, 1964) que, pour certaines argiles dites « actives », on obtient des courbes légèrement concaves, ce qui vient confirmer nos propositions.

L'identité des processus ne s'arrête pas là, car les phénomènes d'hystérésis sont en tous points comparables.

Nous conclurons qu'il y a les plus fortes présomptions après une étude comparée systématique, pour que les résultats des deux types de mesures coïncident.

Mais la méthode osmotique a l'avantage d'éviter la lenteur des essais œdométriques de même que la lourdeur des dispositifs mathématiques et instrumentaux qu'ils requièrent.

E. — *Conditions d'établissement d'un modèle physique*

L'unification des résultats concernant la déshydratation et la réhydratation des pâtes argileuses laisse entrevoir un certain nombre de conditions posées à l'établissement d'un modèle physique, ainsi :

— Pour une activité nulle de l'argile (le terme activité ayant un sens large), on constate que le sol perd un volume d'eau constant par unité pF. Autrement dit, les forces globales d'attraction pour l'eau diminuent exponentiellement avec la quantité d'eau fixée.

— Pour des argiles actives, le sol perd relativement aux matériaux non actifs une plus grande quantité d'eau que prévue par unité pF, la différence maximale se situant à pF 4,5.

— C'est dans la mesure même de cette différence que le sol est susceptible de se réhumecter. On ajoutera que ce sont précisément ces argiles qui dégagent le plus de chaleur à la réhumectation (heat of wetting des auteurs anglo-saxons), l'hygroscopicité étant située aux environs de pF 4,5.

— Le paramètre A représenterait ce qu'il est convenu d'appeler l'activité des argiles, laquelle doit pouvoir être rattachée à des propriétés spécifiques comme la géométrie des réseaux, l'écartement des feuillets et la répartition des charges, cationiques en particulier.

L'établissement des relations e' — pF pourra, dès lors que celles-ci ont été unifiées, servir de bancs d'essai pour mieux nous éclairer sur la nature et l'incidence des forces en jeu en phase d'hydratation et de dessèchement des sols.

CONCLUSION

Lorsqu'on applique une succion sur une pâte saturée à la limite de liquidité, on provoque un dessèchement qui se traduit par une baisse globale d'humidité.

Cette baisse d'humidité n'est pas proportionnelle au pF et on obtient des courbes d'autant plus prononcées que la part des argiles gonflantes est importante.

Ces courbes traduisent deux effets distincts :

— l'un qui correspond à une désorption des molécules d'eau fixées, accompagnée par une contraction du matériau, en absence d'air. Les liaisons entre les particules

argileuses deviennent alors de plus en plus fortes, en proportion de l'énergie de succion appliquée ;

— l'autre est un effet corrélatif s'appliquant à un système pseudo-élastique c'est-à-dire que la succion exercée provoque une déshydratation à caractère réversible, d'où l'effet d'hystérésis.

Les phénomènes qui accompagnent le dessèchement et la réhumectation des pâtes ont été représentés par une expression mathématique unique en très bon accord avec les données expérimentales.

On peut considérer avant d'aller plus loin que le paramètre A qui s'est avéré spécifique de la nature des argiles est relié à un potentiel de gonflement réversible.

En définitive, l'utilisation de pâtes a permis d'éliminer d'emblée un certain nombre de facteurs aléatoires rencontrés quand on détermine des courbes classiques de pF sur des sols structurés. Il sera ensuite plus facile d'étudier ces facteurs dès lors que les caractéristiques hydriques des pâtes serviront de référence.

Reçu pour publication en novembre 1975.

REMERCIEMENTS

Que Monsieur DUTIL, Directeur de la Station de Science du Sol de Chalons-sur-Marne (I.N.R.A.) veuille agréer mes remerciements pour l'aide qu'il m'a apportée.

SUMMARY

DRYING AND REWETTING OF CLAY-PASTES : STANDARDIZATION OF RESULTS

Soil moisture is usally determined with air-dried and softed soils. In this study, the soils are used at upper plastic limit or Atterberg's liquid limit.

Soil moisture is expressed by void ration (e)/void ratio plastic limit (eWL) rate, in others words, for saturated soils, by water content/liquid limit rate :

$$e' = \frac{e}{e\mathrm{WL}} \times 100 = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{WL}} \times 100.$$

Log. tension curves are determined by osmotic method for drying and rewetting ranges. Hysteresis effect appear clearly and experimental equation is presented :

$$e' = \mathrm{Zd}[18.7 + \mathrm{A}(\mathrm{Zr} - 5)]$$

in wich
$\mathrm{Zd} = 7 - \mathrm{pF}$ at dried state,
$\mathrm{Zr} = 7 - \mathrm{pF}$ at rewetting,
A = parameter related to clay activity (total variation range : 0 to 3.74).

In the case of drying phase only, this equation takes the following form :

$$e' = \mathrm{Zd}[18.7 + \mathrm{A}(\mathrm{Zd} - 5)]$$

These two equations gain a far-reaching importance because of the diversity of the tested soils and show the identity of the process for each phase for all clay types.

This equation remains valid as far as pastes are satured, that is as far as the shrinkage limit of soil is not reached.

Besides the comparaison between our results and compression tests reveals that the phenomena would be similar if not identical in satured and consolitated soils.

ZUSAMMENFASSUNG

ENTWASSERUNG UND WIEDERANFEUCHTUNG VON TONPASTEN : VEREINHEITLI CHUNH DER ERGEBNISSE

Die Wassereigenschaften (Feuchtigkeit-pF Kurven) sind gewöhnlich mit luftgetrockneten und abgesiebeten Böden bestimmt.

In dieser Untersuchung sind die Böden als eine zur Fliessgrenze stehende Tonpaste benutzt und die Feuchtigkeit als eine Beziehung zwischen der Porenziffer und dem der Fliessgrenze entsprechenden Faktor ausgedrückt, das heisst :

$$e' = \frac{e}{e\mathrm{WL}} \times 100 = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{WL}} \times 100.$$

Die e'/pF Kurven, die dank einer osmotischen Methode ausgearbeitet sind, betreffen die Entwässerungsphase sowie die Wiederanfeuchtungsphase und lassen einen Hysteresiseffekt deutlich erkennen.

Die gesamten experimentellen Ergebnisse können in einer Gleichung des folgenden Typs zusammengefasst worden :

$$e' = \mathrm{Zd}[18.7 + \mathrm{A}(\mathrm{Zr} - 5)]$$

wo
$\mathrm{Zd} = 7 -$ pF zur Entwässerungsphase,
$\mathrm{Zr} = 7 -$ pF zur Wiederanfeuchtungsphase,
A = ein Parameter, das um so grösser ist als Töne aktiv sind (gesamte Variationsbreite : von o *bis* 3.74).

Die Gleichung verwandelt sich in :

$$e' = \mathrm{Zd}[18.7 + \mathrm{A}(\mathrm{Zd} - 5)]$$

für die einzige Entwässerungsphase.

Diese beiden Gleichungen gewinnen eine sehr allgemeine Bedeutung wegen der Vielfältigkeit der erprobten Böden und der Tontypen und zeigen die Gleichheit des Vorgangs in jede der Phasen.

Diese Gleichung gilt so lange die Pasten gesättigt sind, d ; h so lange die Schrumpfungsgrenze nicht erreicht ist.

Daneben zeight das Vergleichen unserer Ergebnisse mit Kompressions-versuchen dass die Prozesse in gesättigten und befestigten böden ähnlich wenn nicht identisch wären.

РЕЗЮМЕ

Высушивание и новое оводнение глинистых паст. — Об'единенные результаты.

Ж. ДЕ КРЕСИ.

Водные характеристики (кривые влажности — pF) почв определяются обычно на образцах высушенных на воздухе и просеянных через сито.

В данной работе, почвы употреблялись в форме глинистых паст, находившихся на границе перехода в жидкое состояние, и их влажность выражалась в форме соотношения между показателем пустот и показателем границы этого состояния, или :

$$\mathrm{e}' = \frac{\mathrm{e} \times 100}{\mathrm{eWL}} = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{WL}} \times 100.$$

Кривые e′/pF были реализованы с помощью осмотического метода; они относятся как к фазе высушивания, так и к фазе нового оводнения и четко выявляют эффект гистерезиса.

Общность экспериментальных результатов может быть выражена формулой следующего типа :

$$e' = Zd\,[18{,}7 + A\,(Zr - 5)].$$

В этой формуле Zd = 7 — представляет pF достигнутый при высушивании

Zr = 7 — pF при оводнении

A — параметр увеличивающийся по мере увеличения активности глин (общая вариация от 0 до 3,74).

Формула эта превращается в $e' = Zd\,[18{,}7 + A\,(Zd - 5)]$ для одной только фазы высушивания.

Эти два выражения имеют общее значение благодаря разнообразию исследованных почв и типов глин, и точно идентифицируют каждую из фаз процесса.

Формула остается действительной пока пасты насыщены, то-есть пока не достигнута граница усушки.

Кроме того, сравнение полученных результатов с результатами опытов компрессии, показывает что в случаях насыщения, или упрочнения почв, явления эти остаются одинаковыми, если не сказать теми-же.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAVER L. D., 1961. *Soil Physics*, 3e Edition, John Wiley and Sons, New York, London.

CHILDS E. C., YOUNG E. G., 1958. The use of moisture characteristics curves in assessing the soil stability of opencast coal sites. *Symp. Intern. Structure*, Gand, 415-421.

COSTET J., SANGLERAT G., 1969. *Cours pratique de mécanique des sols*. Dunod, Paris, p. 88 et 111-115.

HAINES, 1923. Cité par BAVER L. D., *Soil Physics*.

MEANS R. E., PARCHER S. V., 1964. *Physical Properties of Soils*, 2e Edition, Charles E. Merill Books, Colombia Ohio, p. 225.

MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (1), 541-552.

PÉRIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne (Sols hydromorphes) « Le potentiel capillaire à la capacité au champ ». *Ann. agron.*, **14** (3), 308-309.

VON SHAHABI, 1971. Indirecte Ermittung der Plastizitätswerte nach Atterberg durch Bestimmung der Wasserbindung. *Kultur und Flubereinigung*, **12**, 47-56.

WALDRON et MANBEIAN, 1970. Soil moisture characteristics by osmosis with polyethylene glycol. *Soil Sci.*, **110** (6), 401-404.

Ann. agron., 1975, **26** (6), 671-691.

ÉTUDE COMPARÉE DES MÉTHODES D'ESTIMATION D'ETP EN CLIMAT MÉDITERRANÉEN DU SUD DE LA FRANCE (RÉGION D'AVIGNON)

B. SEGUIN

avec la collaboration technique de R. DEVILLARD, C. POLIZZANO et G. THOUY

Station de Bioclimatologie,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Les mesures d'ETP effectuées à la Station de Bioclimatologie I.N.R.A. d'Avignon-Montfavet ont été comparées, sur une période de trois ans (1971-1973), aux estimations obtenues à partir des méthodes le plus couramment utilisées dans la pratique. Les calculs, effectués à l'échelle décadaire, montrent que les formules d'origine empirique (THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE, TURC) sont mal adaptées aux caractéristiques du climat méditerranéen, plus particulièrement pour la période estivale, où elles sous-estiment notablement l'ETP. Bien qu'elle tende également à sous-estimer les valeurs mesurées, la formule de PENMAN apparaît plus satisfaisante pour cette même période. Par ailleurs, les méthodes simplifiées élaborées par la Météorologie Nationale permettent d'approcher de façon satisfaisante les valeurs obtenues par la formule de PENMAN. Enfin, l'évaporation d'un bac d'eau libre enterré, de type Colorado, ne semble pas pouvoir être reliée directement de façon simple aux mesures d'ETP.

I. — INTRODUCTION

Une des caractéristiques les plus importantes du climat méditerranéen, du point de vue agronomique, est la sécheresse estivale marquée, due à l'influence conjuguée d'une faible pluviosité et d'une forte demande climatique en eau résultant du haut niveau du rayonnement solaire. Le développement d'une agriculture intensive ne peut alors se concevoir sans l'apport d'eau complémentaire par irrigation. L'impor-

tance croissante des surfaces concernées par l'irrigation rend nécessaire une utilisation rationnelle de l'eau disponible, et, par suite, en premier lieu, une connaissance satisfaisante de l'évapotranspiration potentielle ETP.

Malgré le développement récent des systèmes de mesure directe d'ETP (évapotranspiromètres pesables ou lysimètres à drainage), le réseau ainsi constitué est nettement insuffisant pour obtenir une représentativité spatiale satisfaisante, et il demande par ailleurs une attention et une surveillance importantes pour assurer la validité des mesures. L'estimation indirecte d'ETP à partir des paramètres climatiques semble donc devoir être encore d'une grande utilité pour de nombreuses années.

Bien que les formules d'estimation aient été souvent utilisées dans la pratique, leurs domaines de validité respectifs, ainsi que l'ordre de grandeur de leur précision, sont assez mal connus pour la région méditerranéenne. Compte tenu de l'extension importante de l'irrigation dans le sud de la France, il nous a semblé intéressant d'entreprendre une étude comparée des formules d'estimation utilisées le plus couramment, en prenant comme référence les mesures d'ETP effectuées à la Station de Bioclimatologie I.N.R.A. d'Avignon-Montfavet.

II. — REPRÉSENTATIVITÉ DE LA MESURE D'ETP

L'évolution du concept d'évapotranspiration potentielle conduit à une pluralité de définitions suivant le but recherché. Il importe donc de préciser que, dans le cadre de cette étude, ETP est simplement définie comme l'expression de la demande climatique en eau mesurée par la consommation d'un couvert végétal de référence, en l'occurrence un gazon maintenu court. Bien qu'arbitraire, cette définition tend à être généralisée dans les études expérimentales, et présente donc l'avantage de permettre des études comparatives dans les différents sites d'étude.

La mesure est effectuée sur un évapotranspiromètre pesable de 5 m^2 de surface et de 0,75 m de profondeur. La sensibilité du dispositif (pesons à jauge de contrainte et pont enregistreur d'extensiométrie) permet d'obtenir une précision de l'ordre de 0,1 mm (Samie et de Villèle, 1970 ; Archer, Grebet et Samie, 1970). L'évapotranspiromètre est entouré d'un anneau de garde d'environ 60 m × 100 m, maintenu dans les mêmes conditions d'exploitation. Les erreurs éventuelles dues, soit au débordement de la végétation, soit à la hauteur du couvert végétal (de Villèle, 1972) sont réduites dans la mesure du possible, le gazon étant maintenu à une hauteur voisine de 10 cm (ce gazon est constitué d'une fétuque *festuca elatior*, variété manade, pouvant supporter des pointes de consommation en eau de l'ordre de 1,2 mm · h^{-1}).

L'ensemble des mesures est implanté sur le terrain expérimental de la Station de Bioclimatologie d'Avignon-Montfavet (43°55 N, 4°51 E). Ce terrain est situé dans une zone dégagée (environ 200 m le séparent des obstacles les plus proches dans le sens des vents dominants) où les conditions d'évaporation sont relativement homogènes, ainsi que l'on a pu le vérifier par quelques mesures de contrôle ; cependant, la région, dans son ensemble, présente un relief plus ou moins tourmenté et est cloisonnée par un réseau assez dense de brise vent. Les conditions particulières de turbulence ainsi créées ne sont pas sans intervenir sur l'évapotranspiration ainsi que

sur le plus ou moins bon accord constaté entre les données mesurées et calculées ; les résultats de cette étude ne seraient donc transposables en toute rigueur qu'à des situations analogues. On peut admettre que ces dernières sont assez caractéristiques de la région provençale. Rappelons en outre que la région considérée est soumise à l'influence du Mistral, vent de N-NW, généralement sec et froid, qui souffle en moyenne 140 jours par an, dont 60 jours avec une vitesse moyenne du vent supérieure à 5 m · s^{-1}. Cette particularité locale tendrait à limiter la représentativité de l'étude à la basse vallée du Rhône. Mais, d'une part l'influence du Mistral est généralement faible pendant les mois d'été à forte valeur d'ETP, d'autre part l'ensemble du midi méditerranéen est soumis à des vents locaux de caractéristiques voisines de celles du Mistral. Il semble donc que, dans les limites des 5 à 10 p. 100 qui affectent la précision même de nos données mesurées ou calculées, les conclusions de cette étude puissent être étendues à l'ensemble des régions du Sud de la France soumises au climat méditerranéen.

III. — LES FORMULES D'ESTIMATION ÉTUDIÉES

Dans la pratique, le choix de la méthode d'estimation d'ETP dépend, en premier lieu, de l'échelle de temps choisie en fonction du but recherché. C'est ainsi que des études précises sur l'influence des divers facteurs microclimatiques peuvent nécessiter l'obtention de données journalières, ou même horaires, d'ETP.

Dans le cadre de cette étude, essentiellement orientée vers les problèmes d'irrigation, la période de temps qui a été choisie comme référence est de l'ordre de la décade, l'échelle mensuelle étant trop large pour suivre les périodes de pointe de consommation en eau, alors que l'échelle journalière est trop détaillée pour le but recherché. Les données de base sont donc des données décadaires (la dernière décade de chaque mois comportant, 11, 10, 9 ou 8 jours), portant sur l'ensemble des trois années 1971 à 1973. Compte tenu du volume important de chiffres correspondants, certains tableaux et figures ne comportent que les valeurs moyennes mensuelles, dans le but de simplifier la présentation des résultats.

Les formules étudiées sont celles qui sont le plus couramment utilisées dans la pratique. Elles comprennent, d'une part les formules climatologiques empiriques obtenues par ajustement statistique avec les principaux facteurs climatiques (formules de THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE et TURC), d'autre part la formule de PENMAN et les méthodes dérivées simplifiées, récemment mises au point en France par la Météorologie Nationale (BROCHET et GERBIER, 1972-1974). Les modalités de calcul des différentes formules sont résumées dans l'annexe I.

En dehors des formules climatiques, l'ETP est souvent estimée, dans la pratique, à partir de bacs d'évaporation en utilisant des coefficients appropriés. La Station ne dispose pas, pour le moment, du bac de type « Classe A » dont l'usage tend à se généraliser et qui est actuellement recommandé à des fins de normalisation. Des mesures sont, par contre, effectuées sur un bac d'eau libre enterré, adapté du type « Colorado » (section carrée de 1 m × 1 m, 60 cm de profondeur, rebord de 10 cm avec niveau de l'eau maintenu au niveau de la surface du sol, peinture en gris clair).

IV. — ANALYSE DES RÉSULTATS A L'ÉCHELLE ANNUELLE

Dans la pratique courante, les formules d'estimation sont souvent utilisées pour évaluer les besoins en eau globaux à l'échelle annuelle. Les résultats pour Avignon-Montfavet sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1

Tableau comparatif des totaux annuels exprimés en mm et des rapports ET/ETP *des valeurs* ET *calculées par les différentes méthodes à la valeur* ETP *mesurée* (évapotranspiromètre gazon)

	Année						Moyenne 1971-1973	
	1971		1972		1973			
	ET	ET/ETP	ET	ET/ETP	ET	ET/ETP	ET	ET/ETP
ETP	1 063	1,00	1 027	1,00	1 106	1,00	1 065	1,00
Thornthwaite	788	0,74	747	0,73	783	0,71	772	0,72
Blaney-Criddle	1 105	1,04	1 099	1,07	1 109	1,00	1 104	1,04
Turc	923	0,87	923	0,90	962	0,87	936	0,88
Penman	983	0,93	1 035	1,01	1 070	0,97	1 030	0,97
Météor. Nat. 1	1 071	1,01	1 067	1,04	1 196	1,08	1 111	1,04
Météor. Nat. 2	991	0,93	1 011	0,99	1 113	1,01	1 032	0,97
E_0 Colorado	986	0,93	970	0,94	1 028	0,93	995	0,93

Ce tableau montre qu'à l'échelle annuelle, les formules de Blaney-Criddle et de Penman donnent des estimations satisfaisantes (écart inférieur à 5 p. 100), alors que les formules de Thornthwaite et, à un degré moindre, de Turc, sous-estiment de façon significative la valeur mesurée (— 28 p. 100 et — 12 p. 100 respectivement). L'évaporation du bac d'eau libre enterré de type « Colorado », quant à elle, sous-estime globalement ETP d'environ 7 p. 100. Au niveau des formules de la Météorologie Nationale, la 2e version permet d'obtenir une très bonne approximation de la formule de Penman, alors que la 1re version conduit à une surestimation notable de celle-ci (de l'ordre de 7 p. 100). Il faut noter, par ailleurs, que la variabilité des rapports ET/ETP apparaît relativement faible d'une année sur l'autre, surtout pour les formules de Thornthwaite et Turc, mais également pour l'ensemble des autres méthodes (bac enterré en particulier).

Malgré l'importance pratique de ces données globales pour l'estimation directe des pertes en eau annuelles au niveau d'une région, elles restent partielles et pourraient conduire à des conclusions erronées quant à la validité respective des diverses formules pour des périodes de temps plus réduites, ainsi que le montre l'analyse des résultats aux échelles mensuelle et décadaire.

V. — ANALYSE DES RÉSULTATS AUX ÉCHELLES MENSUELLE ET DÉCADAIRE

Avant d'aborder l'analyse des résultats des échelles de temps plus courtes, il est nécessaire de noter que les différents couples de valeurs n'ont pas la même importance pratique, la signification des valeurs de la période hivernale étant faible par rapport à celles de la période d'été. Non seulement en effet, les valeurs estivales sont celles qui ont la plus grande importance pour les problèmes d'irrigation, mais également l'erreur relative commise sur la mesure d'ETP est beaucoup plus notable en période hivernale, l'erreur absolue étant relativement constante, et de l'ordre de 0,1 mm, ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Compte tenu de leurs particularités distinctes, nous serons amenés à discuter séparément les résultats des formules « empiriques » (THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE, TURC), de la formule de PENMAN et des méthodes dérivées qui ont été établies par la Météorologie Nationale, et enfin des mesures d'évaporation du bac d'eau libre enterré.

Avant d'aborder cette discussion, une vue d'ensemble des résultats peut être obtenue à partir du tableau 2 qui présente les valeurs moyennes mensuelles (période 1971-1973) obtenues à partir des différentes méthodes.

TABLEAU 2

Tableau des valeurs moyennes mensuelles sur la période 1971-1973, exprimées en mm · j^{-1}

Mois	ETP	ET_{TH}	ET_{BC}	ET_{TU}	ET_{PE}	ET_{MN1}	ET_{MN2}	E_{0c}
J	0,7	0,4	1,7	0,7	0,7	1,0	0,7	1,1
F	1,2	0,6	2,0	1,1	1,5	1,9	1,5	1,8
M	1,9	0,9	2,4	1,6	2,3	2,6	2,3	2,2
A	2,8	1,7	3,1	2,8	3,5	3,6	3,5	3,1
M	4,4	2,9	3,9	3,8	4,2	4,3	4,3	3,6
J	5,3	3,8	4,4	4,5	5,0	5,0	5,0	4,3
Jt	6,2	4,7	4,7	5,0	5,6	5,8	5,7	4,9
A	5,4	4,2	4,3	4,3	4,6	4,7	4,5	4,0
S	3,4	2,8	3,5	3,1	3,2	3,4	3,3	3,3
O	1,7	1,7	2,7	1,9	1,6	1,8	1,6	1,8
N	1,1	0,8	2,0	1,0	0,9	1,3	1,0	1,4
D	0,6	0,5	1,6	0,7	0,7	1,0	0,8	1,0

5. 1. — *Formules de* THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE *et* TURC

L'évolution des valeurs mensuelles moyennes (fig. 1 *a*) fait apparaître clairement que le bon accord observé, à l'échelle annuelle, entre la formule de BLANEY-CRIDDLE et l'ETP mesurée résulte, en fait, d'une surestimation hivernale et d'une sous-estimation estivale également notables. Par contre, les formules de THORNTH-

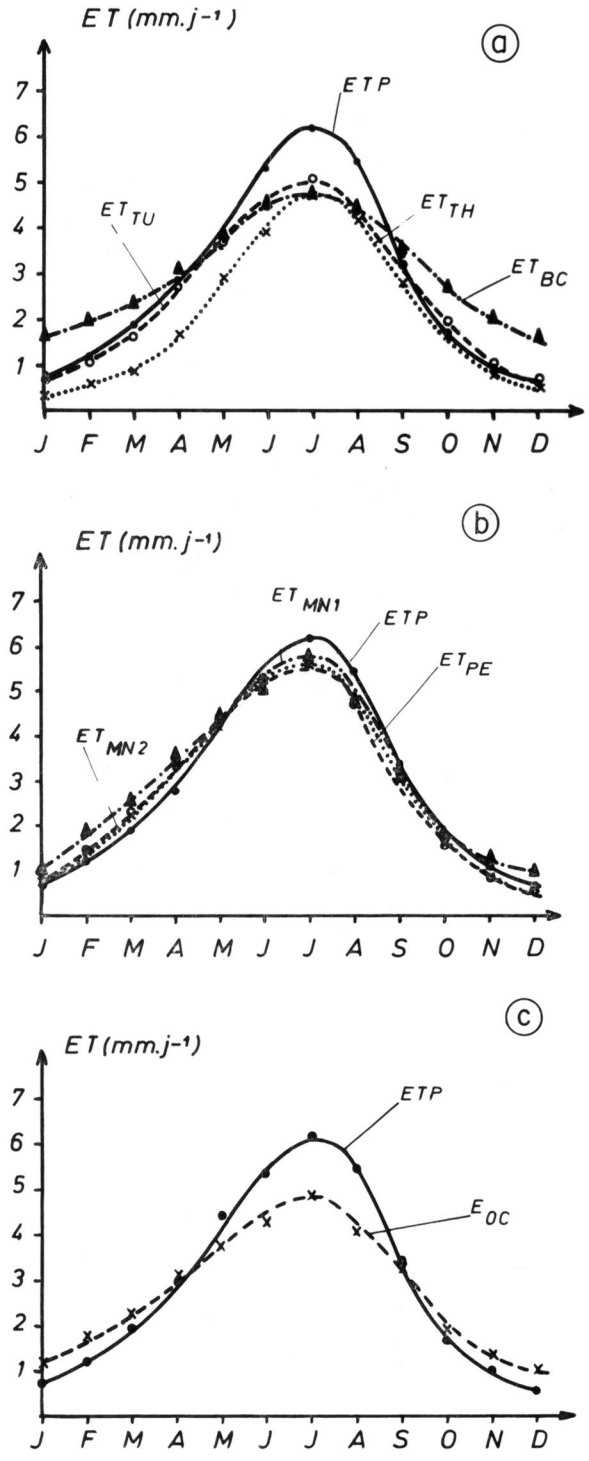


FIG. 1. — *Variation mensuelle moyenne* (période 1971-1973) *de la mesure d'*ETP *et des estimations à partir*

a : des formules de THORNTHWAITE (ET_{TH}), BLANEY-CRIDDLE (ET_{BC}), TURC (ET_{TU}) ;
b : des formules de PENMAN (ET_{PE}), Météorologie Nationale (ET_{MN_1} et ET_{MN_2}) ;
c : du bac enterré de type « Colorado ».

WAITE, et, à un degré moindre, de TURC, sous-estiment la valeur mesurée d'ETP de façon relativement régulière sur l'ensemble de l'année.

La formule de TURC apparaît comme la plus satisfaisante en période hivernale, alors que celle de BLANEY-CRIDDLE entraîne une très forte surestimation de septembre à avril et que celle de THORNTHWAITE sous-estime ETP d'environ 40 p. 100 de novembre à mai.

Pour les mois d'été à valeurs d'ETP significatives, les estimations fournies par les trois formules sont très voisines. Une nette tendance à la sous-estimation apparaît, légèrement plus marquée pour la formule de THORNTHWAITE (25 p. 100) que pour celles de TURC et BLANEY-CRIDDLE (20 p. 100 environ). Il semble, par suite, qu'aucune des formules considérées ne puisse permettre de prévoir les pointes de consommation en eau : ainsi, alors que la valeur extrême en moyenne décadaire s'est élevée, pour juillet 1973, à 7,2 mm · j^{-1} pour ETP mesurée, les estimations correspondantes à partir des formules de THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE et TURC étaient seulement de 5,3, 5,0 et 5,4 mm · j^{-1} respectivement, soit une sous-estimation de l'ordre de 2 mm · j^{-1}.

Ces observations sont confirmées par les corrélations entre valeurs calculées et valeurs mesurées pour la période 1971-1973, correspondant à des moyennes décadaires exprimées en mm · j^{-1}. Ces corrélations, représentées dans les figures 2 *a*, 2 *b* et 2 *c*, prennent les expressions suivantes :

Pour l'ensemble de la période ($n = 106$) :

$$ET_{TH} = 0{,}73\ ETP + 0{,}1 \qquad r = 0{,}94$$
$$ET_{BC} = 0{,}52\ ETP + 1{,}5 \qquad r = 0{,}96$$
$$ET_{TU} = 0{,}75\ ETP + 0{,}4 \qquad r = 0{,}98$$

Pour les mois d'été (mai à septembre inclus, $n = 45$) :

$$ET_{TH} = 0{,}59\ ETP + 0{,}8 \qquad r = 0{,}79$$
$$ET_{BC} = 0{,}35\ ETP + 2{,}4 \qquad r = 0{,}84$$
$$ET_{TU} = 0{,}58\ ETP + 1{,}3 \qquad r = 0{,}93$$

L'ensemble de ces données est en bon accord avec les observations de SARRAF (1973) pour le Liban, où les formules considérées sous-estiment également considérablement les valeurs d'ETP de la période estivale. Cette étude a montré, par ailleurs, que ces mêmes formules ne permettaient pas de rendre compte de la différence notable d'ETP qui apparaît entre la plaine côtière du Liban et la plaine intérieure de la Bekaa, où se font sentir les influences conjuguées de la continentalité et de l'altitude. Il n'est donc pas possible de les utiliser pour mettre en évidence les fortes variations locales qui peuvent apparaître dans le bassin méditerranéen, en fonction de ces facteurs.

5. 2. — *Formule de* PENMAN

Les résultats précédents n'ont rien de réellement surprenant, dans la mesure où les formules correspondantes ont été obtenues par des ajustements statistiques avec un nombre limité de données climatiques et ne peuvent donc être également adaptées à des climats de caractéristiques très différentes. Par contre, il est généralement admis que la base théorique de la formule de PENMAN, ainsi que le détail des

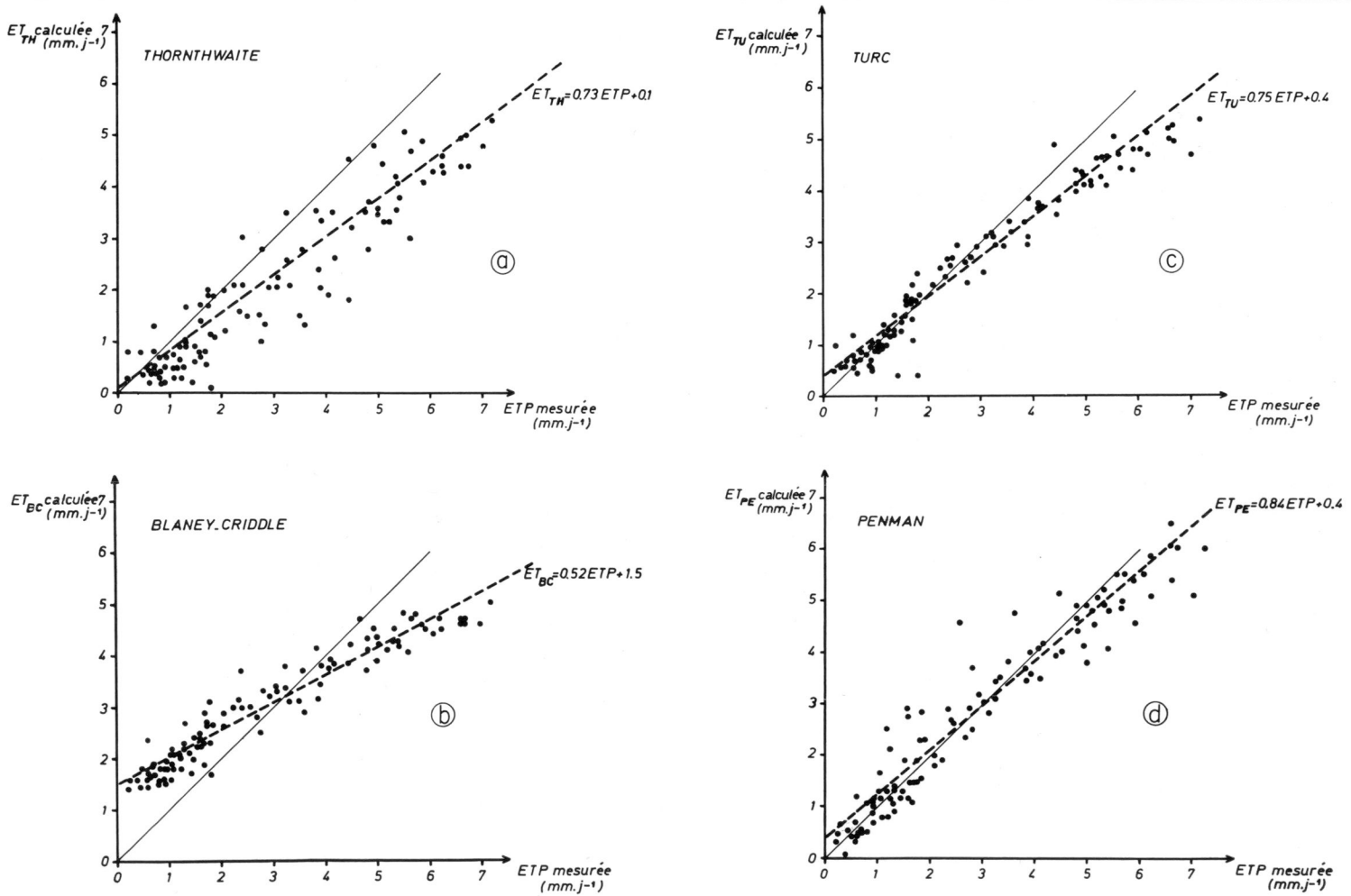


FIG. 2. — *Comparaison des valeurs décadaires d'*ETP *mesurée avec les valeurs décadaires correspondantes des estimations obtenues par les différentes formules*

a : THORNTHWAITE — *c* : TURC
b : BLANEY-CRIDDLE — *d* : PENMAN

paramètres climatiques qu'elle fait intervenir, doivent lui permettre de mieux exprimer les variations locales d'ETP. Par ailleurs, sa validité a été établie, au moins pour les valeurs horaires et journalières, par des mesures précises et complètes (TANNER et PELTON, 1960 ; VAN BAVEL, 1966), qui ont également montré qu'elle permettait de prendre en compte l'influence des apports d'énergie par advection (1), qui peuvent intervenir de façon notable en climat méditerranéen.

Ces prévisions ne sont pas pleinement confirmées par l'analyse des résultats, ainsi que le montre la figure 1 *b*. La formule de PENMAN présente la même tendance, bien que moins marquée, que celle de BLANEY-CRIDDLE, à savoir une surestimation en période hivernale et une sous-estimation en période estivale. La sous-estimation en période d'été varie entre 10 et 15 p. 100. La valeur extrême en moyenne décadaire s'élève à 6,0 mm · j^{-1} pour juillet 1973, ce qui correspond à une erreur de 1,2 mm · j^{-1} par rapport à ETP mesurée, au lieu de 2 mm · j^{-1} pour les formules d'origine empirique. Ceci est confirmé par les corrélations suivantes (fig. 2 *d*) :

Ensemble de l'année :

$$ET_{PE} = 0{,}84\ ETP + 0{,}4 \qquad r = 0{,}94$$

Mois d'été :

$$ET_{PE} = 0{,}72\ ETP + 1{,}0 \qquad r = 0{,}91$$

Là encore, ces résultats sont en bon accord avec ceux de SARRAF. Celui-ci montre que, contrairement aux autres, la formule de PENMAN permet de prévoir des valeurs plus élevées dans la Bekaa que sur la plaine côtière, sans cependant rendre compte entièrement de la différence d'ETP entre ces deux sites.

Bien qu'elle apparaisse donc plus satisfaisante que les formules d'origine empirique, en particulier pour les mois d'été, la formule de PENMAN n'est pas adaptée au climat méditerranéen, au moins sous sa forme originale. Ce n'est pas l'expression de la formule elle-même qui doit être mise en cause, mais la nature des relations empiriques utilisées pour estimer les différents termes qui la composent.

Ce sujet a fait l'objet d'une analyse détaillée dans une autre publication (SEGUIN, 1974), qui fait apparaître les différentes sources d'erreurs suivantes, brièvement résumées :

— l'albédo moyen 0,20 utilisé conduit à une légère surestimation hivernale et sous-estimation estivale du rayonnement solaire observé (1-*a*) R*g*, dans la mesure où les valeurs mesurées de l'albédo du couvert de gazon servant de référence à la mesure d'ETP sont plutôt voisines de 0,25 et de 0,18 respectivement pour ces périodes ;

— le rayonnement net infrarouge est obtenu à partir d'une formule empirique dérivée de celle de BRUNT, avec des coefficients qui ont été déterminés en climat tempéré. Des coefficients différents devraient être adoptés en zone méditerranéenne, où l'utilisation des valeurs précédentes conduit à une surestimation du terme de rayonnement infrarouge, et, par suite, une sous-estimation du rayonnement net R*n* ;

(1) L'apport d'énergie par advection (ou énergie advective) correspond au 2e terme de l'équation de PENMAN $\frac{\gamma E_a}{\Delta + \gamma}$ (voir annexe 1, paragraphe 1-4). Nous avons volontairement gardé le terme d'énergie advective utilisé de façon courante, bien qu'il serait plus exact de parler d'énergie convective (l'advection correspondant à un transfert horizontal lié à une discontinuité spatiale).

— la formule de PENMAN, étant basée sur l'équation du bilan d'énergie, devrait, en principe, être calculée pour des périodes de l'ordre de la demi-heure. Dans la pratique, les calculs sont effectués directement à l'échelle journalière, ou même décadaire, ce qui pose des problèmes délicats de définition des valeurs moyennes. Des erreurs significatives peuvent en résulter, d'une part pour l'estimation du terme Δ (voir l'annexe I), d'autre part pour le calcul du déficit de saturation ;

— la fonction F (u) de vitesse du vent doit être adaptée au type de couvert végétal considéré, et, en particulier, à sa rugosité ainsi qu'on l'a rappelé plus haut (cf. § II, représentativité). L'influence des écarts résultant de l'adoption des différentes fonctions proposées est d'autant plus notable que le terme advectif est fort, ce qui est le cas de la région d'Avignon, avec la présence du Mistral.

5. 3. — *Formules de la Météorologie Nationale* (BROCHET et GERBIER)

Quelle que soit la précision que l'on puisse espérer obtenir à partir d'une adaptation de la formule de PENMAN, l'inconvénient de la complexité des mesures et des calculs nécessaires subsistera ou même sera accentué. Il sera donc utile de pouvoir disposer de méthodes simplifiées du type de celles développées par la Météorologie Nationale (BROCHET et GERBIER, 1972-1974), à condition d'obtenir des estimations suffisamment proches de celles de la formule de PENMAN.

L'examen des figures 1 *b* et 3 *a-b* montre que cette condition est remplie pour les deux versions des formules de la Météorologie Nationale (MN_2 et MN_1), en dépit toutefois de quelques écarts relativement plus importants observés pour la MN_1 en période hivernale.

Ces constatations sont confirmées par les corrélations suivantes (obtenues, non plus entre les valeurs estimées d'ET et la valeur mesurée d'ETP, mais entre les valeurs estimées respectivement d'ET et ET_{PE}, puisque, dans leur principe même, les formules de la Météorologie Nationale doivent permettre une estimation simplifiée de la formule de PENMAN, et non directement des valeurs d'ETP).

Ensemble de l'année :

$$ET_{MN_1} = 0{,}95\ ET_{PE} + 0{,}4 \qquad r = 0{,}99$$
$$ET_{MN_2} = 0{,}99\ ET_{PE} + 0{,}1 \qquad r = 0{,}99$$

Mois d'été :

$$ET_{MN_1} = 0{,}97\ ET_{PE} + 0{,}3 \qquad r = 0{,}96$$
$$ET_{MN_2} = 1{,}01\ ET_{PE} + 0{,}0 \qquad r = 0{,}96$$

Les différences observées entre les deux formules ne peuvent résulter que de la méthode d'estimation du terme A, puisque la méthode d'estimation du terme radiatif est commune aux deux formules. Ceci permet d'expliquer leur concordance en période estivale, ainsi que l'écart constaté en période hivernale, l'influence du terme A étant forte en hiver et faible en été (plus de 50 p. 100 de l'ETP globale de septembre à mars, moins de 30 p. 100 de mai à août). La méthode utilisée dans la 2e formule apparaît donc satisfaisante pour le calcul du terme advectif. L'écart maximum observé en moyenne décadaire par rapport au même terme dans la formule de PENMAN est inférieur à 0,2 mm, et la corrélation entre les termes advectifs respectifs A_{MN_2} et A_{PE} s'écrit :

$$A_{MN_2} = 0{,}99\ A_{PE} + 0{,}0 \qquad r = 0{,}96$$

Ceci est tout à fait logique, car les méthodes de calcul sont exactement semblables, la méthode de la Météorologie Nationale faisant seulement intervenir une simplification par l'utilisation de tables.

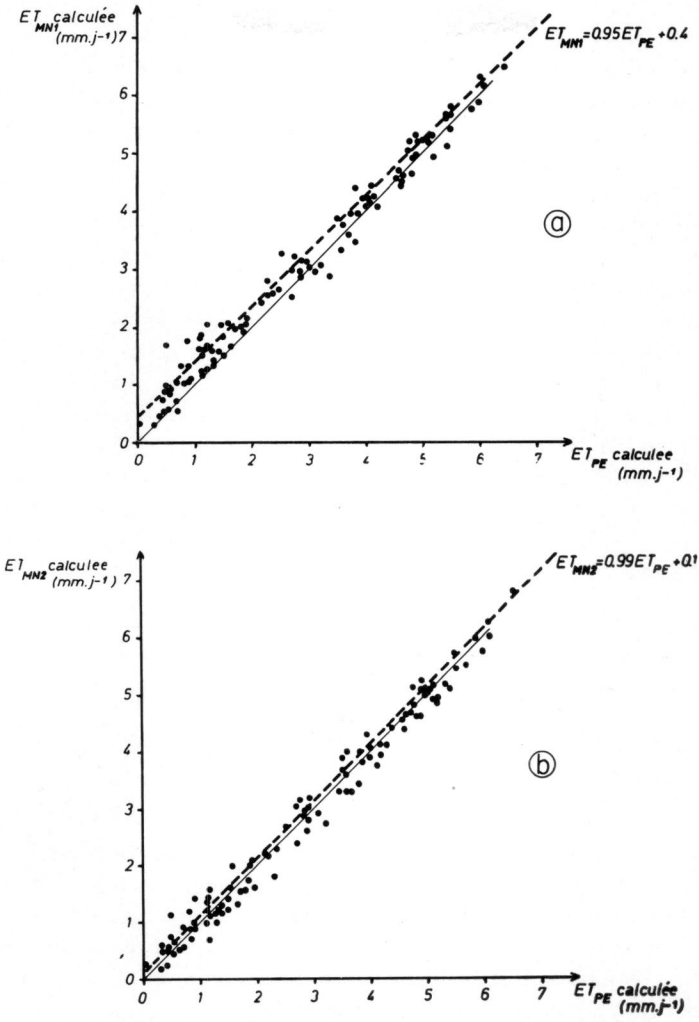


FIG. 3. — *Comparaison des valeurs décadaires calculées par la formule de* PENMAN *avec les valeurs décadaires calculées par les formules de la Météorologie Nationale*

a : 1re formule MN_1
b : 2e formule MN_2

Par contre, dans la 1re formule, où l'estimation du terme advectif se fait à partir de l'évaporomètre Piche, une surestimation relativement régulière apparaît, de l'ordre de 0,2 mm, mais pouvant atteindre 0,7 mm en période de fort Mistral. Ce qui conduit à la corrélation suivante :

$$A_{MN1} = 1{,}01\ A_{PE} + 0{,}2 \qquad r = 0{,}94$$

Il semble donc que le coefficient n utilisé soit légèrement trop fort dans le cas de cette étude (à titre indicatif, le coefficient calculé serait de l'ordre de 0,35 en hiver et 0,27 en été, au lieu de 0,40 et 0,30 respectivement). Ceci pourrait résulter d'une particularité locale du climat de la région d'Avignon, mais cette hypothèse semble peu vraisemblable, compte tenu de la répartition géographique des postes utilisés par la Météorologie Nationale (les postes de Montélimar et de Montpellier encadrent assez bien celui d'Avignon pour le facteur latitude, et sont également soumis à l'influence du Mistral, en particulier le premier cité). Dans le cas contraire, cet écart ne pourrait résulter que d'une divergence sur le recueil des données climatiques entre le réseau de l'I.N.R.A. et celui de la Météorologie Nationale : ceci semble se produire effectivement pour le calcul de la température du point de rosée, qui fait l'objet d'un seul relevé quotidien à Avignon (9 h) au lieu de trois pour les stations de la Météorologie Nationale. Le calcul du déficit de saturation moyen à l'échelle de la journée peut en être sous-estimé, ce qui peut conduire à un écart de 0,3 mm sur le terme advectif, ainsi que nous l'avons montré par ailleurs (SEGUIN, 1974). Dans le cas où cette hypothèse serait justifiée, cela impliquerait que les valeurs de la formule de PENMAN considérées dans cette étude sont légèrement sous-estimées, du moins pour le terme advectif, ceci étant dû uniquement au mode d'obtention des données climatologiques, et donc indépendant de la formule elle-même.

Cette discussion sur le terme advectif ne doit pas faire oublier l'importance prépondérante du terme radiatif, surtout pour les périodes d'été. La bonne concordance des formules MN_1 et MN_2 avec celle de PENMAN pour ces mêmes périodes laisse supposer que la méthode d'estimation du terme radiatif R est valable, ainsi que le confirment les corrélations :

Ensemble de l'année :

$$R_{MN} = 0{,}96\ R_{PE} + 0{,}1 \qquad r = 0{,}99$$

Mois d'été :

$$R_{MN} = 0{,}97\ R_{PE} + 0{,}1 \qquad r = 0{,}96$$

Ainsi que le pensaient BROCHET et GERBIER (1972), la variabilité interannuelle est suffisamment faible pour que l'adoption de coefficients fixes soit possible. L'écart maximum observé en moyenne décadaire a été de l'ordre de 10 p. 100 en été, soit de 0,4 mm. L'écart absolu est le même en hiver, ce qui conduit à un écart relatif plus important. La dispersion des résultats est donc légèrement plus importante en période hivernale, ce qui n'a pas de portée pratique réellement gênante.

5. 4. — *Mesures d'évaporation du bac d'eau libre enterré* (type « Colorado »)

L'analyse des données moyennes mensuelles (tabl. 2 et fig. 1 *c*) fait apparaître une variation de l'évaporation du bac enterré assez semblable à celle constatée précédemment pour les différentes formules d'estimation : surestimation par rapport à ETP mesurée en période hivernale, sous-estimation systématique en période esti vale avec des résultats très voisins de ceux des formules de BLANEY-CRIDDLE et TURC.

L'étude des valeurs décadaires, représentées sur la figure 4, conduit à l'établissement des corrélations suivantes :

Ensemble de l'année :

$$E_{0c} = 0{,}65\ ETP + 0{,}8 \qquad r = 0{,}90$$

Mois d'été :

$$E_{0c} = 0{,}55\ ETP + 1{,}3 \qquad r = 0{,}72$$

Ces corrélations apparaissent effectivement comme proches de celles précédemment établies pour les formules de BLANEY-CRIDDLE et TURC. En particulier, la corrélation pour les seuls mois d'été est très proche de celle caractérisant la formule de TURC.

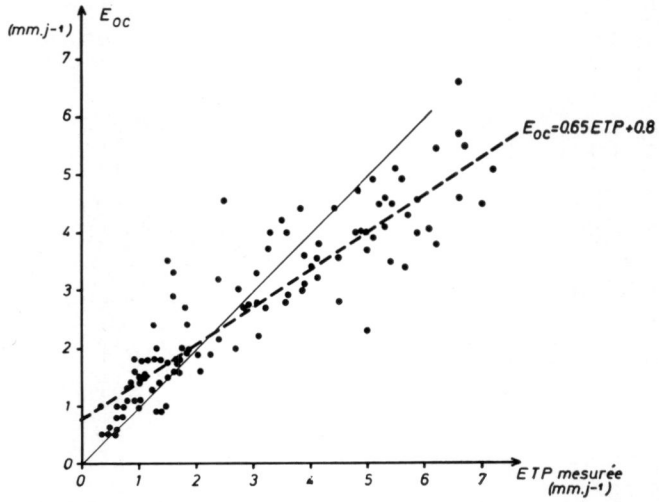


FIG. 4. — *Comparaison des valeurs décadaires d'*ETP *mesurée avec les valeurs décadaires d'évaporation du bac enterré de type « Colorado »*

Il peut également être intéressant de noter que la dispersion des résultats est plus élevée dans le cas de l'évaporation du bac d'eau libre enterré (comparaison des figures 2 *b*, 2 *c* et 4), ainsi que le confirment les coefficients de corrélation correspondants.

Contrairement au cas des formules d'estimation, ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de SARRAF (1973) au Liban. Aussi bien dans la Bekaa que sur la Côte, les mesures d'ETP et de E_{0c} sont très proches, au point que les données du bac de type Colorado peuvent constituer, d'après SARRAF, un bon moyen d'estimation de l'ETP à l'échelle, non seulement annuelle, mais également mensuelle. Il peut être intéressant de noter, par ailleurs, que les données de RIOU (1971) obtenues en Afrique Centrale font apparaître, elles, un rapport $\frac{E_{0c}}{ETP}$ de l'ordre de 1,2 pour les valeurs moyennes mensuelles.

Cette divergence notable qui apparaît entre les différents sites ne peut être expliquée simplement, compte tenu de la complexité du mécanisme évaporatoire et des échanges énergétiques à l'intérieur du bac enterré (voir, par exemple, BULTOT et DUPRIEZ, 1973) et de l'absence de mesures complémentaires (température de l'eau à différentes profondeurs dans l'eau du bac, mesure des échanges aux parois du bac, etc.) à la Station d'Avignon.

Tout au plus, et en écartant l'hypothèse d'erreurs de mesure systématiques, peut-on formuler quelques remarques sur la réponse du bac enterré aux différents facteurs climatiques. Aux échelles de temps considérées dans cette étude, cette réponse est délicate à mettre en évidence, car la variabilité des différents éléments est fortement tamponnée, à mesure que la période de temps considérée augmente, et se transforme en une variation moyenne saisonnière dont le poids prépondérant tend à masquer l'influence intrinsèque des différents facteurs. Aussi est-il nécessaire d'avoir recours à l'examen des valeurs journalières bien que celles-ci ne soient pas, en principe, à considérer dans le cadre de cette étude. Compte tenu du nombre trop important de données qui résulterait de l'examen à cette échelle de temps, il est nécessaire de n'examiner qu'une période limitée à titre d'exemple. En fait, la figure 5 montre

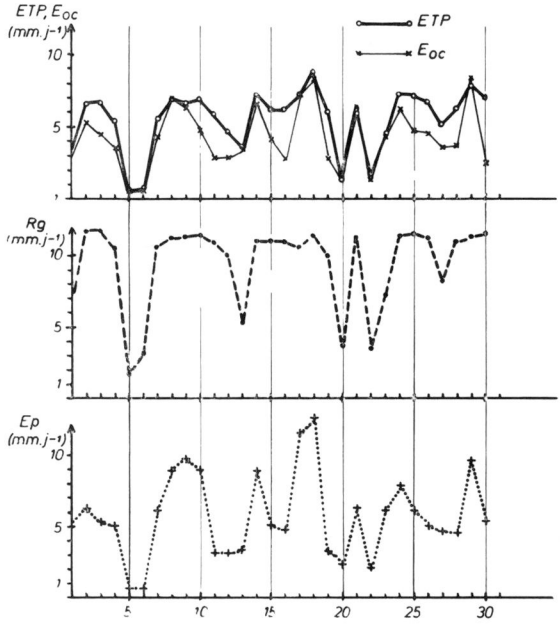


FIG. 5. — *Évolution simultanée des valeurs journalières d'*ETP, E_{0c} (évaporation du bac enterré), Rg (rayonnement global) *et* E*p* (évaporation du Piche sous abri) *pour une période prise à titre d'exemple* (juin 1973)

clairement la différence de réponse entre E_{0c} et ETP aux facteurs rayonnement d'une part, advection d'autre part (ces termes étant pris au sens énergétique des terme radiatif et advectif définis par l'équation de PENMAN). Alors que ETP réagit principalement aux variations du rayonnement global R*g*, avec une variabilité d'ordre inférieur liée au facteur advectif représenté par les données de l'évaporomètre Piche (ce qui correspond parfaitement aux contributions relatives de ces facteurs telles que l'expriment la formule de PENMAN ou les formules de BROCHET et GERBIER), il apparaît que l'évaporation du bac enterré est en relation beaucoup plus directe avec le facteur advectif estimé par E*p* et suit de façon moins stricte les variations de R*g*.

Bien que ces tendances apparaissent moins nettement à l'échelle décadaire, pour les raisons exposées plus haut, elles se retrouvent dans les corrélations entre E_{0c} d'une part, ETP d'autre part, avec le rayonnement global Rg et le « Piche corrigé » Ep_c (résultant de la multiplication de l'évaporation du Piche sous abri Ep par un facteur correctif $1 + \lambda\,\theta$ où θ est la moyenne de la température de l'air et de celle du point de rosée (BOUCHET, 1963)).

$$\begin{aligned} ETP &= 0{,}67\ Rg - 1{,}1 \qquad r = 0{,}94 \\ E_{0c} &= 0{,}47\ Rg - 0{,}1 \qquad r = 0{,}92 \\ ETP &= 0{,}28\ Ep_c - 0{,}1 \qquad r = 0{,}88 \\ E_{0c} &= 0{,}22\ Ep_c + 0{,}4 \qquad r = 0{,}93 \end{aligned}$$

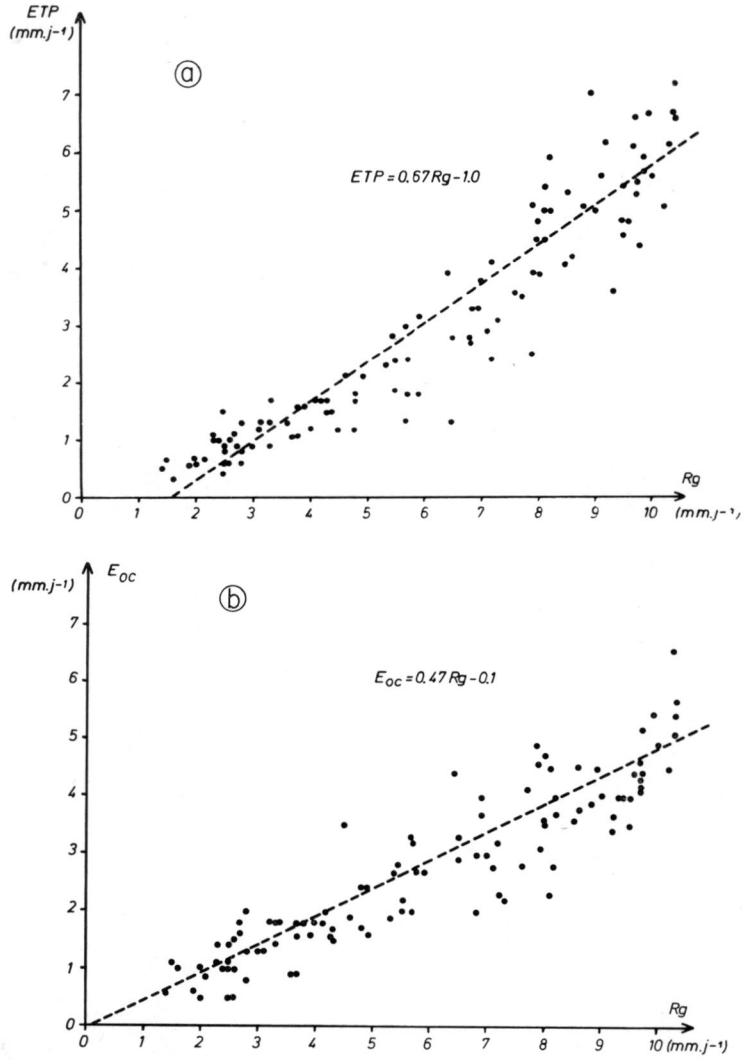


FIG. 6. — *Comparaison des valeurs décadaires d'*ETP (a) *et de* E_{0c} (b) *avec les valeurs décadaires du rayonnement global mesuré* Rg

L'examen des figures correspondantes 6 *a-b* et 7 *a-b*, ainsi que de ces corrélations, confirme l'impression qualitative retirée de l'observation des valeurs journalières : par rapport à ETP, E_{0c} apparaît comme moins sensible au facteur radiatif et plus lié au facteur advectif. Il est bon de noter également, à partir de la figure 7 *a*, que l'utilisation de la formule dite du « Piche corrigé » nécessiterait l'adoption d'un coefficient α variable — de l'ordre de 0,3 en été et 0,15 en hiver — pour la région d'Avignon, ce qui est en bon accord avec les premières données de SCHOCH et de VILLÈLE (1972). Ces constatations sont, en fait, en bon accord avec celles de BULTOT et DUPRIEZ (1973), pour lesquels la pénétration partielle du rayonnement solaire incident dans l'eau conduit à une réduction de l'énergie radiative disponible au niveau de la surface.

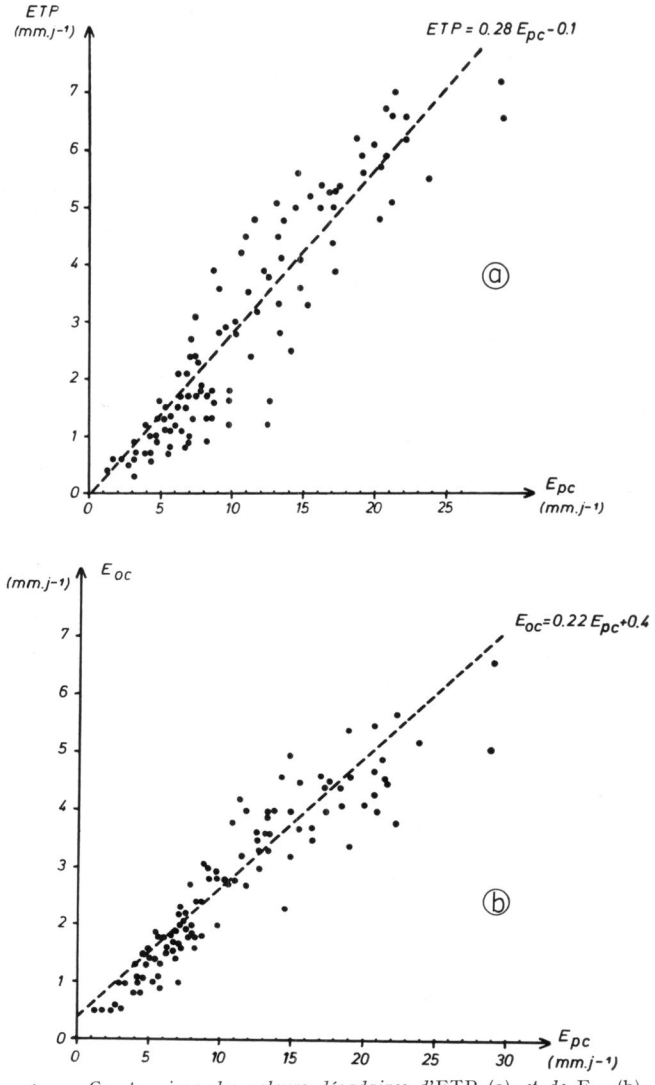


FIG. 7. — *Comparaison des valeurs décadaires d'*ETP (a) *et de* E_{0c} (b) *avec les valeurs décadaires du « Piche corrigé »* E_{pc}

Par ailleurs, la tendance du bac enterré à une utilisation plus forte de l'énergie advective ressort également des travaux, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, de RIOU (1971).

Sans constituer une explication réelle des écarts constatés entre les différents sites (Sud de la France, Liban, Afrique Centrale), ces réactions différentes d'ETP et de E_{0c} aux apports d'énergie radiative et advective pourraient permettre de formuler une hypothèse faisant intervenir les ordres de grandeur relatifs de ces termes dans les différentes zones climatiques. Une étude détaillée serait nécessaire pour établir la validité de cette hypothèse qui est seulement suggérée dans cette étude.

VI. — CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir que les méthodes d'estimation d'ETP d'origine empirique sont mal adaptées au climat méditerranéen, en particulier pour les mois d'été à forte consommation d'eau, où elles font apparaître une sous-estimation de l'ordre de 2 mm · j^{-1}. Bien que la formule de PENMAN ne soit pas entièrement satisfaisante (sous-estimation de l'ordre de 1,2 mm · j^{-1}), elle apparaît plus apte à suivre les variations de l'ETP.

De plus, des améliorations dans l'estimation des différents termes qui la composent (en particulier, utilisation de la mesure du rayonnement net et prise en compte de la rugosité du couvert végétal de référence) pourraient permettre d'approcher ETP avec une précision accrue, de l'ordre de 5 p. 100. Dans cette optique, la méthode simplifiée mise au point par la Météorologie Nationale s'avère particulièrement intéressante, dans la mesure où elle permet par une procédure simple et rapide, d'obtenir des valeurs effectivement très proches de celles données par la formule de PENMAN. La souplesse d'emploi de cette méthode peut permettre, par ailleurs, d'obtenir des informations relativement précises sur les variations spatiales d'ETP aux échelles d'espace inférieures à l'échelle régionale. Un réajustement sur des données améliorées de la formule de PENMAN pourrait permettre, là encore, de porter la précision de l'estimation à un niveau tout à fait satisfaisant.

Quant à l'évaporation du bac d'eau libre enterré de type Colorado, elle ne semble pas pouvoir être reliée de façon simple à l'ETP mesurée. Les réactions différentes aux facteurs advectif et radiatif mis en jeu pourraient expliquer cette divergence de comportement. Dans une optique pratique d'estimation d'ETP, cette donnée ne semble donc pas pouvoir être plus intéressante que le calcul à partir de la formule du « Piche corrigé », par exemple, dans la mesure où ces deux méthodes nécessitent un étalonnage préalable pour pouvoir être adaptées à la climatologie locale.

Reçu pour publication en décembre 1975.

SUMMARY

A COMPARATIVE STUDY OF ESTIMATION METHODS OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION IN MEDITERRANEAN CLIMATE OF THE SOUTH OF FRANCE (REGION OF AVIGNON)

Measurements of potential evapotranspiration PET on the experiment field of I.N.R.A. Station de Bioclimatologie in Avignon-Montfavet (France) are compared to climatic corresponding estimates from currently used methods for a three-year period (1971 to 1973). From the results of calculations, based on 10 days values, it appears that empirical formulas (THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE, TURC) are badly adapted to mediterranean climate, especially for the summer period, where they notably underestimate PET. In spite of a similar tendency, PENMAN's formula seems to be more satisfactory. Simplified formulas elaborated by the French Meteorological Office (Météorologie Nationale) are in good agreement with PENMAN values. Finally, evaporation values of a « Colorado » sunken pan are not directly in relation with measured PET values.

ZUSAMMENFASSUNG

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNG DER METHODEN FÜR DIE SCHÄTZUNG DER POTENTIELLEN DUNSTAUSSCHWITZUNG UNTER DEM MITTELMEERKLIMA SÜDFRANKREICHS (IN DER GEGEND VON AVIGNON)

Die an der Station für Bioklimatologie in Avignon-Monfavet (I.N.R.A.) druchgeführten Messungen der potentiellen Dunstausschwitzung wurden während drei Jahren (1971-1973) mit den durch die üblichsten Methoden erzielten Schätzungen verglichen. Die für zehntägige Perioden durchgeführten Berechnungen zeigen dass die empirischen Formeln (THORNTHWAITE, BLANEY-CRIDDLE, TURC) an die Eigenschaften des Mittelmeerklimas besonders für die Sommerperiode schlecht angepasst sind, wo sie die potentielle Dunstausschwitzung bedeutend unterschätzen. Obgleich sie auch zur Unterschätzung der gemessenen Werten neight, erscheint die PENMANsche Formel für die selbe Periode ausreichender zu sein. Daneben erlauben die vom nationalen Wetterdienst verarbeiteten vereinfachten Methoden die dank PENMANscher Formel erzielten Werten genügender Weise zu nähern. Schliesslich scheint die Verdünstung eines vergrabenen mit Gravitationswasser gefüllten Kastens des Colorado Typs nicht mit den Messungen der potentiellen Dunstausschwitzung unmittelbar und einfach verbunden sein können.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение методов оценки ETP в Средиземноморском климате юга Франции (Район Авиниона).

Б. СЕГЕН.

Измерения ETP проведенные на Биоклиматологической Станции И.Н.Р.А. в Авинионе - Монфаве сравнивались в течении трехлетнего периода (1971-1973) между собой и с оценками полученными с помощью методов наиболее часто применяющихся в практике. Рассчеты, прове-

денные в десятидневном масштабе, показывают что эмпирические формулы (Торнтуэйт, Бленэй-Криддль, Тюрк) плохо применены к характерностям Средиземноморского климата, особенно к его летнему периоду, когда формулы эти сильно недооценивают ETP. Формула Пенмана, несмотря на ее тенденцию к той-же недооценке измеренных величин, кажется более удовлетворительной для этого периода. Кроме того, упрощенные методы, выработанные Национальной Метеорологией, также позволяют довольно удовлетворительное приближение к величинам полученным благодаря формуле Пенмана. И, наконец, по всей вероятности, нет возможности найти прямую и простую связь между испарением свободной воды из бака типа Колорадо, закопанного в землю, и измерениями ETP.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARCHER Ph., GREBET Ph., SAMIE C., 1970. Évapotranspiromètre à capteur dynamométrique. In *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère, I.N.R.A.*, Paris, 267-273.

BROCHET P., GERBIER N., 1972. Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **23** (1), 31-49.

BROCHET P., GERBIER N., 1974. *L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle.* (Édition revue et complétée). Monographie de la Météorologie Nationale, nº 65, Paris, 67 p.

BOUCHET R. J., 1963. Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. In *L'eau et la production végétale*, I.N.R.A., Paris, 152-225.

BULTOT F., DUPRIEZ, 1973. L'évaporation d'un bac d'eau libre. Sa signification restreinte. *Journ. Hydrology*, **20**, 83-95.

PENMAN H. L., 1956. Évaporation : an introductory survey. *Neth. J. Agr. Sci.* (1), 9-29.

RIOU Ch., 1971. Évaporation en bac et ETP. Expression de l'évaporation d'une petite nappe d'eau en fonction des données sous abri. *Bull. AIHS*, XVI (2), 53-65.

SAMIE C., de VILLÈLE O., 1970. Méthodes et techniques de mesure de l'évapotranspiration. In *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, I.N.R.A., Paris, 257-267.

SARRAF S., 1973. *Estimation de l'évapotranspiration potentielle et consommation en eau des cultures en région semi-aride* (Liban). Thèse U.E.R. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France), 114 p.

SCHOCH P., de VILLÈLE O., 1969. Difficultés d'estimation de l'évapotranspiration dans la région d'Avignon. *Bull. Techn. Inform.*, **238**, 239-243.

SEGUIN B., 1974. Estimation of potentiel evapotranspiration in mediterranean regions : adaptation of PENMAN'S method to local climatic conditions. Communication présentée au Symposium *Heat and mass transfer in the environment of vegetation*, Dubrovnik (Yougoslavie), août 1974.

TANNER C. B., PELTON W. L., 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance methode of PENMAN. *J. Geoph. Res.*, **65** (10), 3391-3413.

VAN BAVEL C. H. M., 1966. Potential evapotranspiration ; the combination concept and its experimental verification. *Water Res. Res.*, **2** (13), 455-467.

DE VILLÈLE O., 1972. *Méthodologie de la mesure de l'évapotranspiration maximale : influence de la surface du lysimètre et de la hauteur de la végétation.* Note technique M 72-3. Station de Bioclimatologie I.N.R.A., Avignon-Montfavet, 9 p.

ANNEXE I

RAPPEL DES MODES DE CALCUL DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ESTIMATION
(Les coefficients permettent d'obtenir des valeurs moyennes en mm · j^{-1})

1. 1. — *Formule de* THORNTHWAITE

$$ETP_{TH} = 16 \left[\frac{10\ T_a}{I}\right]^a F(\lambda)$$

T_a étant la température moyenne décadaire en °C.

Pour chaque année de référence est calculé l'indice thermique annuel $I = \sum_1^{12} i$, somme des indices mensuels

$$i = \left[\frac{T}{5}\right]^{1{,}514}$$

où T est la température moyenne mensuelle.

A partir de cet indice, est calculé l'exposant :

$$a = 6{,}75 \cdot 10^{-7}\ I^3 - 7{,}71 \cdot 10^{-5}\ I^2 + 1{,}79 \cdot 10^{-2}\ I + 0{,}49$$

Par ailleurs, le facteur $F(\lambda)$ est donné, pour chaque mois, par des tables en fonction de la latitude.

Ces différents termes étant fixés, ETP_{TH} est calculé, pour chaque décade, à partir de la température moyenne décadaire T_a.

Le calcul peut être facilité par l'usage de tables (BROCHET et GERBIER, 1974).

1. 2. — *Formule de* BLANEY-CRIDDLE

$$ETP_{BC} = k \cdot \frac{2{,}54}{10\ n}\ T_F P$$

T_F étant la température moyenne décadaire en °F ;

P est le pourcentage d'heures diurnes de la décade par rapport au total des heures diurnes de l'année, variable en fonction de la saison et de la latitude ;

n est le nombre de jours de la décade (10 pour les deux premières de chaque mois, 8, 10 ou 11 pour la troisième) ;

k est un coefficient cultural, qui a été égal à 0,75 pour le gazon.

Ces coefficients étant déterminés, ETP_{BC} est fonction de T_F, reliée à la température moyenne décadaire T_a en °C par la relation :

$$T_F = \frac{9\ (T_a - 32)}{5}$$

1. 3. — *Formule de* TURC

$$ETP_{TU} = 0{,}013 \left[\frac{T_a}{T_a + 15}\right] [Rg + 50]$$

avec Rg rayonnement global journalier moyen pour la décade exprimé en cal · cm^{-2} et T_a température moyenne décadaire en °C.

Il n'est pas tenu compte du terme correctif $\left[1 + \frac{50 - Hr}{70}\right]$, l'humidité relative moyenne à Avignon étant toujours supérieure à 50 p. 100 à l'échelle décadaire.

1. 4. — *Formule de* PENMAN

$$ETP_{PE} = \frac{\Delta Rn + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

Δ pente de la courbe de tension de vapeur saturante à la température T_a est exprimée en mb ;

$\gamma = 0{,}66$ mb · deg^{-1} (constante psychrométrique) ;

$$Rn = \frac{1}{60}\left[(1 - a)\, Rg - \sigma T_a^4 (0{,}56 - 0{,}08\sqrt{e_a})\left(0{,}1 + 0{,}9\,\frac{n}{N}\right)\right],$$

expression dans laquelle l'albédo a est pris égal à 0,20 et Rg représente le rayonnement global en cal · cm^{-2}, T_a la température moyenne, e_a la tension de vapeur moyenne en mb et $\frac{n}{N}$ la fraction d'insolation.

$$E_a = 0{,}26\,(1 + 0{,}54\,u)\,[E(T_a) - e_a]$$

u étant la vitesse moyenne du vent à 2 m et $E(T_a)$ la tension de vapeur saturante à la température T_a.

1. 5. — *Première formule de la Météorologie Nationale* (BROCHET et GERBIER, 1972)

$$ETP_{MN1} = mRg + nEp$$

avec Rg rayonnement global exprimé en cal · cm^{-2} et Ep évaporation Piche en mm,

m et n sont des coefficients dépendant de la décade et de la latitude,

n est adapté au type de l'abri sous lequel est effectuée la mesure de l'évaporation Piche.

1. 6. — *Deuxième formule de la Météorologie Nationale* (BROCHET et GERBIER, 1974)

$$ETP_{MN2} = mRg + A$$

Le terme mRg est estimé de la même façon que précédemment. Par contre, le calcul du terme advectif A, d'expression identique à celui de la formule de PENMAN, est effectué au moyen de tables, à partir des valeurs moyennes décadaires de la température et de la tension de vapeur de l'air, ainsi que de la vitesse du vent.

Ann. agron., 1975, **26** (6), 693-707.

ADSORPTION DE L'ATRAZINE PAR DES MONTMORILLONITES-Al

R. CALVET et Martine TERCÉ
avec la collaboration technique de Anne-Marie TABAREAU

Station de Science du Sol,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

L'adsorption de l'atrazine par la montmorillonite saturée par l'aluminium dépend du traitement thermique subi par le minéral avant l'adsorption. Quand la température de chauffage augmente, la quantité d'atrazine adsorbée s'accroît également et atteint un maximum pour des températures de l'ordre de 250-300°C. L'adsorption sur le minéral chauffé à 300° fait l'objet d'une étude plus approfondie. L'examen des effets de l'acidité, de la composition du solvant et de la présence de cations minéraux montre que :

— l'adsorption ne se fait pas par échange d'ions,
— l'aluminium joue un rôle déterminant mais doit se trouver sous forme hydroxylée,
— les molécules d'eau interviennent directement dans le mécanisme d'adsorption.

Il apparaît enfin que les molécules d'atrazine sont essentiellement fixées sur la surface externe de l'argile.

I. — INTRODUCTION

L'atrazine (2-chloro-4-éthylamino-6-isopropylamino-s-triazine) est un herbicide couramment utilisé dans la culture du maïs. Son comportement dans les sols dépend de plusieurs phénomènes physico-chimiques parmi lesquels l'adsorption sur les colloïdes minéraux et organiques joue un rôle important. En effet, elle détermine en grande partie la concentration de la solution du sol, donc l'activité biologique de l'herbicide.

Dans les régions tempérées humides où l'aluminisation des argiles est un phénomène assez fréquent, il existe dans le sol des argiles 2/1 plus ou moins hydrolysées et des édifices complexes de type intergrades. La connaissance des interactions entre ces minéraux et les herbicides présente donc un grand intérêt.

Trois types de systèmes peuvent être étudiés : les argiles saturées par l'aluminium, les argiles hydrolysées et les complexes argiles-hydroxydes d'aluminium polymérisés. Les résultats donnés dans ce mémoire concernent un minéral appartenant au premier type : la montmorillonite saturée par l'aluminium.

II. — MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le minéral utilisé est la montmorillonite de Camp Berteau dont la formule structurale est :

$$M^{+}_{0,39}\ [(Al_{1,48},\ Fe^{3+}_{0,15})\ Mg^{2+}_{0,39}]\ (Si_4)\ O_{10}\ (OH)_2$$

La fraction inférieure à 2 microns obtenue par sédimentation est saturée par de l'aluminium apporté sous forme de chlorure. L'argile est ensuite lavée avec de l'eau distillée jusqu'à la disparition des ions Cl^- dans les eaux de lavage. L'argile ainsi obtenue possède une quantité d'aluminium échangeable de 112 meq/100 g. Des chauffages de 14 heures à des températures variant de 100°C à 400°C permettent d'obtenir des échantillons déshydratés.

Les diagrammes de diffraction des rayons X sont obtenus sur des pâtes dans le but d'avoir des valeurs d'espacements interfoliaires dans les conditions les plus voisines de la suspension.

Les mesures d'adsorption sont réalisées de la façon suivante : 50 mg d'argile sont agités pendant 24 heures à 20°C (± 2°C) dans 20 cm³ d'une solution d'atrazine de concentration connue. (Des mesures préliminaires ont montré que l'équilibre d'adsorption était atteint au bout de 4 heures.) La suspension est ensuite centrifugée à 20°C à 40 000 *g*. Après une dilution convenable dans du borate de sodium 0,01 M (pH = 9), l'atrazine est dosée par absorptiométrie UV à $\lambda = 222{,}3$ nm. En présence de diméthylsulfoxyde, la longueur d'onde utilisée est 238 nm. La quantité d'atrazine adsorbée est obtenue par différence entre la quantité initiale apportée et la quantité trouvée en solution après centrifugation. Les mesures de désorption sont effectuées, après l'élimination du surnageant, en ajoutant au culot 20 cm³ de solvant (eau pure ou mélange eau-éthanol) sans atrazine. Après une agitation de 24 heures à 20°C la suspension est à nouveau centrifugée et analysée. Plusieurs opérations de désorption sont ainsi réalisées sur chaque échantillon.

L'aluminium échangeable est obtenu par quatre extractions successives avec $BaCl_2$ N (20 cm³ de solution pour 50 mg d'argile). Le dosage est effectué par colorimétrie avec l'ériochromecyanine R ($\lambda = 535$ nm).

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. — *Espacement interfoliaire des argiles*-Al *chauffées*

Les valeurs de d_{001} données dans le tableau I montrent que les séries de réflexions 001 sont presque rationnelles. Les feuillets présentent donc tous un écartement identique ou, tout au moins, variant très peu autour des valeurs voisines de 19,2 Å et 9,9 Å. Il apparaît que le traitement thermique n'affecte le gonflement dans l'eau qu'à partir de 350°C. Pour des températures inférieures, l'écartement est le même qu'en suspension ; pour des températures supérieures, l'espace interfoliaire n'est plus accessible à l'eau.

TABLEAU I

*Distances **001** des montmorillonites-Al chauffées à différentes températures*

(°C)	001					
	001	002	003	004	005	006
40°	19,6	9,8	6,4			3,18
100°	19,2	9,7	6,33	5,07		3,18
200°	19,2	9,8	6,24			3,20
300°	19,2	10,05				3,19
350°	9,94	4,8	3,16			
400°	9,83	4,7	3,15			

B. — *Adsorption de l'atrazine*

1. *Effet du traitement thermique.*

La figure 1 représente la variation de la quantité d'atrazine adsorbée à partir d'une solution à 25 µg/cm³ en fonction de la température de chauffage de l'argile.

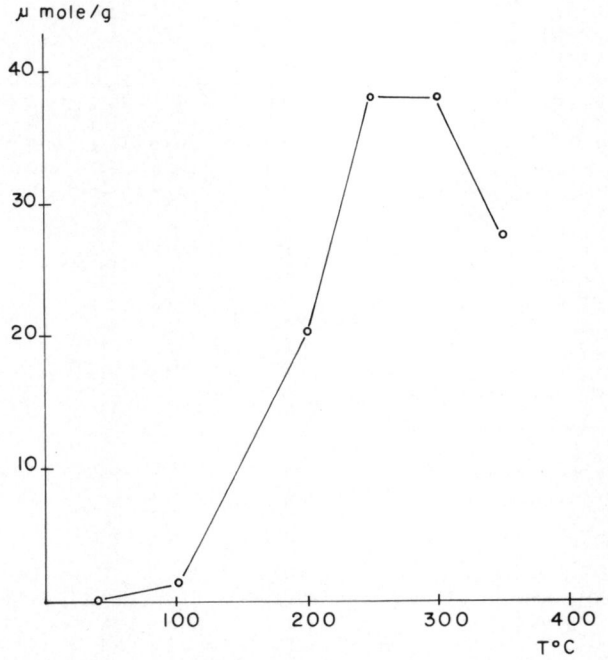


FIG. 1. — *Variation de la quantité d'atrazine adsorbée à partir d'une solution à 25 µg/cm³ en fonction de la température de chauffage de l'argile*

Ces résultats montrent que l'adsorption passe par un maximum entre 250 et 300°C. Il faut souligner l'importance de cette adsorption, bien plus élevée que celle observée avec une argile calcique (de l'ordre de 0,5 µmole/g ; VALLET *et al.*, 1973).

Les isothermes d'adsorption peuvent être décrites par la relation de Freundlich.

$$\frac{x}{m} = KC_e^{1/n}$$

où $\frac{x}{m}$ = quantité adsorbée par gramme de minéral (µmole/g)

C_e = concentration à l'équilibre (µmole/cm³).

La figure 2 donne deux exemples d'isotherme représentée sous la forme $\log\left(\frac{x}{m}\right) = f(C_e)$, et les valeurs de log K et $1/n$ obtenues sont indiquées dans le tableau 2.

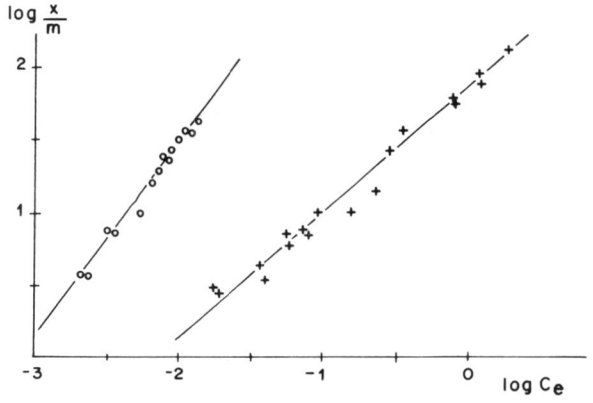


FIG. 2. — *Isothermes d'adsorption de l'atrazine sur l'argile chauffée à 300°C*
o : adsorption à partir d'une solution aqueuse
+ : adsorption à partir d'une solution eau-éthanol à 50 p. 100

$\frac{x}{m}$ = µmole/g ; C_e = µmole/cm³

TABLEAU 2

Valeurs des constantes de l'équation de Freundlich pour différents systèmes solvant-argile

Traitement thermique (°C)	Solvant	$1/n$	log (K)
100°	eau	1,61	1,84
300°	eau	1,34	4,17
300°	eau + alcool 10 p. 100	0,72	3,06
300°	eau + alcool 50 p. 100	0,87	1,87

L'adsorption étant la plus élevée pour un chauffage de 300°C, nous ne donnerons et ne discuterons maintenant que les résultats concernant l'argile chauffée à cette température.

2. *Influence de la nature du solvant.*

Les quantités d'atrazine adsorbées sont relativement limitées en présence de solutions aqueuses, et ce, en raison des faibles concentrations de solutions utilisées. La solubilité de l'atrazine dans l'eau est en effet de 30 µg/cm³ à 20°C (WARD et WEBER, 1968 ; CALVET *et al.*, 1974). Il nous a donc paru intéressant de tenter d'obtenir une plus grande adsorption en utilisant comme solvant des mélanges eau-éthanol. Le tableau 3 donne les résultats obtenus dans différentes conditions.

TABLEAU 3

Effet de la concentration de la solution sur l'adsorption de l'atrazine

Concentration de la solution (µg/cm³)	Teneur en éthanol p. 100 en volume	Quantité adsorbée (µmole/g)
25	0	42
100	10	138
300	30	135
500	50	138

TABLEAU 4

Effet de la composition du solvant sur l'adsorption de l'atrazine

Solvant	Quantité adsorbée (µmole/g)
Eau	16
Eau + Éthanediol	6,3
Eau + Éthanol	3,9
Eau + Acétone	3,2
Eau + DMSO	0

Les quantités adsorbées peuvent donc être considérablement augmentées. Il apparaît cependant que le passage de la concentration de 100 à 500 µg/cm³ ne s'accompagne pas d'une augmentation de l'adsorption. Ceci suggère que l'éthanol peut avoir un effet dépressif sur la fixation de l'atrazine. L'existence de cet effet est confirmée par les résultats donnés dans la figure 3 où est représentée la variation de l'adsorption en fonction de la proportion d'éthanol pour une concentration

d'atrazine constante (25 µg/cm³). Une teneur en alcool supérieure à 20 p. 100 entraîne une réduction importante de l'adsorption. La figure 2 représente l'isotherme d'adsorption obtenue avec une solution à 50 p. 100 d'alcool.

L'utilisation d'autres molécules organiques permet d'obtenir des informations supplémentaires sur l'effet de la nature du solvant utilisé. Des solutions mixtes eau-solvant organique ont été préparées avec l'éthanol, l'éthanediol, l'acétone et le diméthylsulfoxide. La proportion d'éthanol est de 50 p. 100 et celle des autres solvants est telle que les fractions molaires soient les mêmes qu'avec l'alcool. La concentration en atrazine est constante et égale à 10 µg/cm³. Le tableau 4 donne les résultats correspondants.

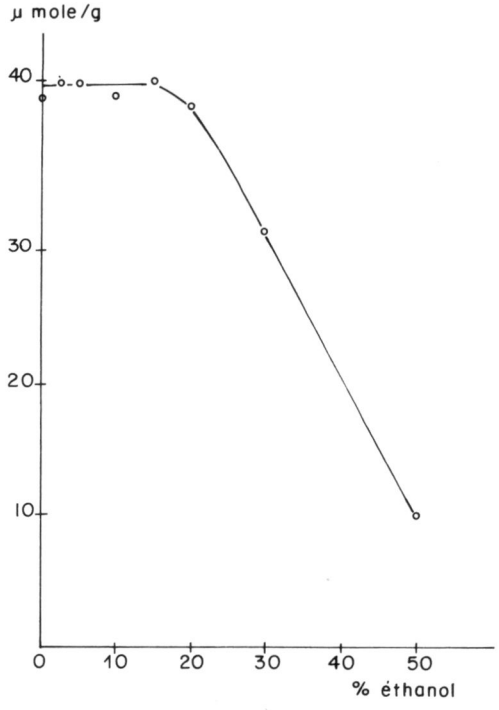


FIG. 3. — *Variation de l'adsorption d'atrazine sur l'argile chauffée à 300°C en fonction de la quantité d'alcool présente dans la solution*

La composition du solvant a donc une action relativement marquée sur l'adsorption.

3. *Effet de l'acidité.*

L'effet de l'acidité est étudié en mesurant l'adsorption en solution aqueuse à différents pH. Le tableau 5 donne les résultats obtenus (à partir de 50 mg d'argile mis dans 20 cm³ de solution à 25 µg/cm³). Il apparaît que l'augmentation de l'acidité n'entraîne pas une très grande variation de la quantité adsorbée.

TABLEAU 5

Effet de l'acidité sur l'adsorption d'atrazine

pH	Quantité adsorbée (µmole/g)
4,6	42
4	44
3,25	45,5
2,1	44,6
1,1	44

C. — *Désorption de l'atrazine*

La figure 4 représente les quantités extraites cumulées, exprimées en pourcentage de la quantité initiale. Le minéral utilisé est l'argile Al chauffée à 300°C ayant

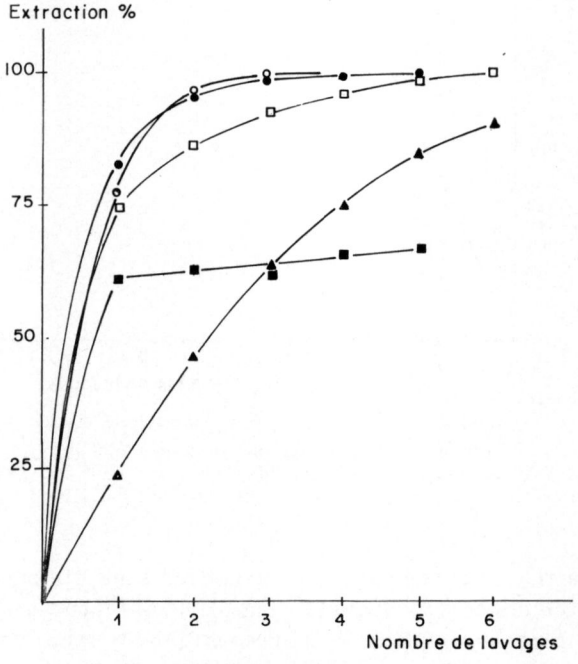


FIG. 4. — *Extraction de l'atrazine et de l'aluminium en présence d'une solution eau-éthanol à 30 p. 100*

○ atrazine extraite avec une solution $BaCl_2$ N
● — — — $CaCl_2$ N
□ aluminium extrait avec une solution $BaCl_2$ N
■ — — — $CaCl_2$ N
▲ atrazine extraite par le mélange eau-éthanol seul

fixé 140 μmole d'atrazine/g à partir d'une solution à 30 p. 100 d'alcool contenant 300 μg d'atrazine/cm³. Chaque extraction est réalisée avec 20 cm³ de mélange eau-alcool à 30 p. 100 soit en l'absence de sel, soit en présence de $BaCl_2$ N ou $CaCl_2$ N. Toute l'atrazine peut être extraite, mais l'extraction est bien plus efficace en présence de Ba^{++} ou de Ca^{++}. L'influence de ces cations existe également en milieu aqueux comme le montrent les résultats de la figure 5 obtenus à partir d'une argile ayant adsorbé 42 μmole/g. Il faut toutefois observer que chaque lavage extrait proportionnellement moins d'atrazine que dans le premier cas. Quand la solution d'extraction ne contient pas de sel, l'aluminium n'est pas désorbé. L'observation essentielle de ces mesures est le parallélisme entre la désorption de l'aluminium et la désorption de l'atrazine.

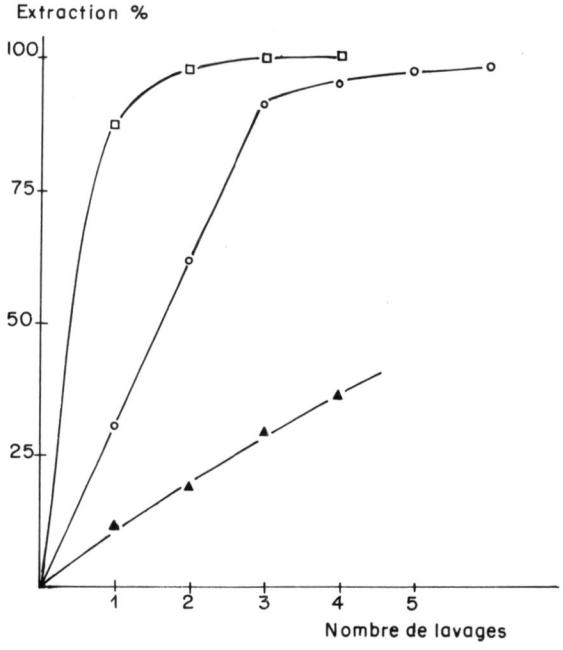


FIG. 5. — *Extraction de l'atrazine et de l'aluminium en présence d'eau*
○ atrazine extraite avec une solution $BaCl_2$ N
▲ — — avec de l'eau
□ aluminium extrait avec une solution $BaCl_2$ N

Après l'extraction totale de l'atrazine, de nouvelles adsorptions ont été réalisées dans les mêmes conditions. Les quantités d'atrazine adsorbées lors de ces dernières mesures sont de 12-15 μmole/g pour les argiles extraites avec $CaCl_2$N ou en l'absence de sel, et nulle pour les argiles extraites avec $BaCl_2$N. Une autre expérience nous a également montré que le séjour prolongé dans l'eau de l'argile Al chauffée entraînait une diminution de sa capacité d'adsorption.

IV. — DISCUSSION

A. — *Données bibliographiques*

Les résultats expérimentaux publiés indiquent que les triazines s'adsorbent principalement par échange d'ions (Webber, 1970 ; Brown et White, 1969). L'importance de l'adsorption dépend du nombre de cations organiques présents dans la suspension d'argile. Elle est donc une fonction du pH du milieu et du pk_a de la molécule dont la valeur est de 1,68 pour l'atrazine (Ward et Webber, 1969). En conditions faiblement acides ou alcalines, toutes les molécules sont neutres et les quantités adsorbées sont faibles. En conditions acides, l'adsorption d'atrazine s'accroît quand le pH diminue par suite de l'augmentation du nombre de molécules ionisées. Cet accroissement est toutefois limité par l'effet de compétition des protons et la quantité adsorbée passe par un maximum (Webber, 1970 ; Vallet *et al.*, 1973). Étant donné la faible valeur du pk_a, l'adsorption ne devrait pouvoir s'observer que pour des pH de l'ordre de 2-2,5. Avec des argiles saturées par des cations alcalins ou alcalino-terreux, cependant, la fixation d'atrazine devient mesurable pour des pH de la suspension de l'ordre de 4 ou 6 selon le type de minéral (Vallet *et al.*, 1973). Ceci est dû aux propriétés particulières de la surface qui sont en grande partie déterminées par l'eau d'hydratation des cations compensateurs (Mortland, 1968 ; Mortland *et al.*, 1969). Fortement polarisées par ces cations, les molécules d'eau présentent un degré de dissociation élevé qui se trouve à l'origine de l'acidité de surface de ces minéraux. Il en résulte que le pH sur la surface est toujours plus faible de 2 à 3 unités que le pH mesuré dans la suspension, pour des argiles saturées par des cations alcalins et alcalino-terreux.

B. — *Caractéristiques générales de l'adsorption de l'atrazine sur l'argile* Al *chauffée*

La relation de Freundlich donne une description numérique des isothermes d'adsorption. L'examen des valeurs de $1/n$ (tabl. 2) indique qu'elles sont du type S avec l'eau seule et du type L quand le solvant est un mélange d'eau et d'alcool (Giles *et al.*, 1960). Cela signifie qu'il y a une compétition pour les sites d'adsorption entre les molécules d'eau et les molécules d'atrazine et qu'il n'y en a pas avec l'éthanol. Sa présence devrait alors accroître l'adsorption. En fait, la quantité adsorbée reste constante ou diminue (fig. 3) car les molécules d'éthanol doivent supprimer des sites d'adsorption.

L'argile chauffée à 350°C adsorbe 27,5 µmole/g (fig. 1), soit les trois quarts de la quantité maximum, alors que les feuillets ne sont pas écartés (tabl. 1). Ceci montre que les molécules d'atrazine sont en grande partie fixées sur la surface externe du minéral. Ce résultat est à rapprocher des observations faites par Talbert et Fletchall (1965). Ces auteurs ont en effet noté que l'adsorption de l'atrazine était très voisine sur une montmorillonite (Wyoming) de ce qu'elle était sur une illite. Ils en avaient alors déduit que les molécules de triazine ne pouvaient pas pénétrer dans l'espace interfoliaire.

Comme le montre le tableau 5 (p. 699), l'augmentation de l'acidité n'entraîne pas un accroissement marqué de l'adsorption. Le passage de la valeur du pH de 4,6 à 2,1 entraîne une variation d'adsorption de 3 µmoles/g, alors qu'avec une argile calcique, cette variation est de l'ordre de 15 µmoles/g (VALLET *et al.*, 1973). Ce fait peut être dû :

— soit à une très grande acidité de surface de l'argile Al chauffée à 300° C permettant l'ionisation de toutes les molécules d'atrazine dès pH = 4,6 ;
— soit à un mécanisme d'adsorption autre que l'échange d'ions.

C. — *Effets du traitement thermique*

Les résultats expérimentaux montrent que les propriétés d'adsorption se développent au cours du traitement thermique de l'argile Al. Celui-ci provoque des modifications du minéral qui sont les conséquences probables de l'augmentation de la dissociation des molécules d'eau résiduelles. La libération de protons qui en résulterait serait d'ailleurs accompagnée de l'hydrolyse de l'aluminium suivant le schéma (MORTLAND, 1968) :

$$[Al\ (H_2O)_x]^{3+} \rightarrow [Al\ OH\ (H_2O)_{x-1}]^{2+} + H^+$$

Trois phénomènes sont alors possibles :

1. *Migration des protons dans le réseau.*

Il a été montré, en effet, que des cations de petit rayon pouvaient aller occuper des cavités octaédriques libres (GLAESER et MERING, 1967 ; CALVET et PROST, 1971). La pénétration dans le réseau des protons situés sur les surfaces basales peut alors entraîner soit la formation locale d'arrangements de type trioctaédrique, soit la libération d'aluminium à partir de la couche octaédrique.

2. *Migrations des cations* Al^{3+} *superficiels dans le fond des cavités hexagonales.*

3. *Polymérisation des cations* Al *hydroxylés* (aluminium initialement sur la surface) donnant des polymères du type de ceux qui ont été observés sur des argiles ou des micas (RICH, 1968 ; HUANG, 1969).

Le chauffage du minéral doit donc être à l'origine de nouvelles propriétés de surface liées à la formation de polymères et à leur hydratation, et à la diminution de la quantité d'aluminium échangeable. Cette dernière est effectivement observée : l'argile Al chauffée à 300°C ne possède que 60 meq/100 g d'aluminium échangeable. La recherche d'éléments de description du mécanisme d'adsorption de l'atrazine doit donc prendre en considération les rôles éventuels de l'aluminium et de l'eau adsorbée sur la surface.

D. — *Rôle de l'aluminium*

Deux ensembles d'observations montrent que l'aluminium intervient dans l'adsorption de l'atrazine. Des argiles biioniques Ca-Al peuvent acquérir à la suite d'un traitement thermique des propriétés du même type que l'argile Al (TERCÉ et CALVET, 1974). La quantité de produit adsorbée est alors une fonction croissante

de la teneur en aluminium. De plus, les résultats des mesures de désorption indiquent que le déplacement de l'aluminium entraîne une importante libération d'atrazine (fig. 4 et 5). Pour observer cette dernière, il n'est cependant pas nécessaire d'enlever tout l'aluminium comme le montrent les résultats obtenus avec $CaCl_2$ (fig. 4). Le rôle de l'aluminium est donc important. Une première explication possible peut être la formation de liaisons de coordination entre Al^{3+} et la molécule d'atrazine. Il apparaît cependant que l'argile Al non chauffée présente une très faible adsorption. C'est pourtant le minéral pour lequel le nombre de cations Al^{3+} est le plus grand. Par contre, le chauffage accroît l'adsorption mais diminue la quantité d'ions Al^{3+}. La fixation de l'atrazine par l'intermédiaire de liaisons de coordination est donc certainement peu probable. Ceci est en accord avec les observations de HANCE (1971). Une deuxième explication peut être avancée : l'aluminium participe indirectement au mécanisme de l'adsorption par l'intermédiaire des molécules d'eau d'hydratation. Fortement polarisées, elles peuvent soit se comporter comme une source de protons permettant la formation de cations organiques par protonation, soit participer à des liaisons hydrogène avec la molécule d'atrazine. Un certain nombre de faits expérimentaux permettent de confirmer le rôle de ces molécules d'eau et, en particulier, celui de leurs propriétés acides.

E. — *Rôle des molécules d'eau*

Les caractéristiques de l'adsorption dépendent de la nature du solvant et le remplacement de l'eau sur la surface de l'argile modifie la quantité d'atrazine adsorbée. Celle-ci diminue quand la teneur en alcool de la solution utilisée dépasse 20 p. 100 (fig. 3, p. 698). Avec différents mélanges eau-solvant organique, elle se classe dans l'ordre décroissant suivant :

$$\text{Eau} > \text{Éthylène glycol} > \text{Éthanol} > \text{Acétone} > \text{Diméthylsulfoxide} \qquad (1)$$

L'effet dépressif des molécules organiques sur l'adsorption d'atrazine peut avoir trois causes :

— les variations de la solubilité,
— la compétition directe entre ces molécules et l'atrazine pour les sites d'adsorption,
— le remplacement des molécules d'eau.

Certains auteurs supposent que l'adsorption est une fonction décroissante de la solubilité (BAILEY *et al.*, 1968). Étant donné que les solubilités mesurées dans les mélanges de solvants utilisés augmentent dans l'ordre :

$$\text{Eau} < \text{Éthylène glycol} < \text{Diméthylsulfoxyde} < \text{Ethanol} < \text{Acétone} \qquad (2)$$

les quantités adsorbées devraient décroître dans le même ordre. Or, ce classement est différent de celui donné précédemment pour l'adsorption. Il n'est donc pas possible d'invoquer les variations de solubilité pour expliquer les résultats expérimentaux. Des observations effectuées sur d'autres herbicides ont également conduit leurs auteurs à une conclusion identique (HARRIS et WARREN, 1964 ; WARD et HOLLY, 1966).

La compétition ne peut s'envisager que dans le cas où l'atrazine serait adsorbée sous forme de molécules neutres. Étant donné que les forces principalement responsables de la fixation des molécules non ionisées sont essentiellement d'origine dipolaire, la quantité d'atrazine adsorbée devrait être d'autant plus faible que la polarité de la molécule organique est grande. Les moments dipolaires des solvants se classent dans l'ordre croissant :

Éthanol < Eau < Éthylène glycol < Acétone < Diméthylsulfoxyde

Ceci signifie, entre autre, que l'adsorption devrait être la plus grande avec l'éthanol. Il n'en est rien. Nous pouvons donc conclure qu'il ne s'agit pas d'un effet de compétition direct entre les molécules de solvant et les molécules d'atrazine.

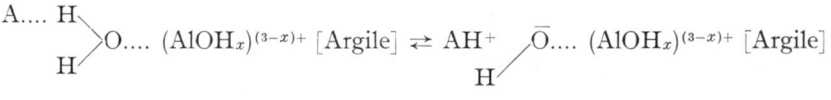
Dans ces conditions, la diminution d'adsorption observée ne peut être due qu'au remplacement des molécules d'eau. Son importance devrait aussi se classer comme les moments dipolaires, ce qui, en fait, ne permet pas d'expliquer les variations de l'adsorption. D'autres propriétés des solvants doivent donc intervenir à côté de la polarité. En réalité, il importe de distinguer les solvants hydroxylés et les solvants non hydroxylés. Pour ces derniers, l'adsorption doit être d'autant plus élevée que leur moment dipolaire est grand. C'est en effet ce qui est observé avec l'acétone et le diméthylsulfoxyde. L'effet des solvants hydroxylés par contre, est la résultante du remplacement des molécules d'eau et de leur aptitude à se comporter comme celles-ci, c'est-à-dire à jouer le rôle de source de protons. L'acidité des alcools primaires est inférieure à celle de l'eau en raison de la diminution de l'effet inducteur de l'oxygène de OH due à l'effet donneur du groupe hydrocarbure. Si celui-ci contient un groupe attracteur d'électrons comme dans un diol, l'effet inducteur de l'oxygène est augmenté.

Par conséquent, l'acidité décroît dans l'ordre :

Eau > Éthylène glycol > Éthanol

C'est l'ordre observé pour l'adsorption. De plus, c'est l'absence de pouvoir donneur de protons qui peut expliquer la faible adsorption observée avec l'acétone et le diméthylsulfoxyde.

Cette discussion montre que l'eau joue un rôle déterminant et que ce sont ses propriétés acides qui sont à l'origine de l'adsorption. Cette acidité peut se manifester à divers degrés, depuis la liaison hydrogène jusqu'à la protonation de la molécule d'atrazine suivant le schéma :



A : molécule d'atrazine neutre. (Liaison hydrogène)

AH$^+$: molécule d'atrazine protonée, (Liaison ionique)

Ce mécanisme est semblable à celui proposé par MORTLAND (1968) pour expliquer la protonation des molécules adsorbées. Il est en accord avec le rôle dominant de l'aluminium observé par RUSSEL *et al.* (1968) dans la protonation de la molécule 3-amino-triazole et montre :

— d'une part qu'il peut y avoir une compétition importante entre les molécules d'eau également accepteurs de protons et les molécules d'atrazine ;

— d'autre part, que le remplacement des molécules d'eau d'hydratation de ($AlOH_x$) par des molécules organiques diminue le nombre de sites d'adsorption.

Il importe de souligner la dualité du rôle des molécules d'eau : elles sont nécessaires à l'adsorption, mais elles peuvent la diminuer en entrant en compétition avec les molécules organiques. Des travaux effectués sur l'adsorption de certaines urées substituées ont également fait apparaître l'importance de l'eau d'hydratation des cations (VAN BLADEL et MOREALE, 1974) et l'existence d'une possible compétition (HANCE, 1965).

L'adsorption sur l'argile Al non chauffée est très faible et du même ordre de grandeur que sur l'argile calcique. Or, le pouvoir donneur des molécules d'eau adsorbées devrait être plus élevé avec les cations Al^{3+} très polarisants qu'avec les cations Ca^{++} qui le sont moins. Il semble donc que l'acidité des molécules d'eau d'hydratation ne puisse pas se manifester. Trois raisons sont possibles :

— le nombre de protons libres n'est pas suffisant ;
— l'arrangement des molécules d'eau sur la surface ne permet pas un transfert efficace des protons ;
— l'orientation des molécules d'eau d'hydratation des cations n'est pas favorable à l'établissement de liaisons hydrogène avec les molécules d'atrazine.

Dans ces conditions, le développement des propriétés d'adsorption dû au traitement thermique peut provenir soit de l'augmentation du nombre de protons, soit de la réalisation d'un arrangement des molécules d'eau permettant un meilleur transfert des protons ou l'établissement de liaisons hydrogène.

V. — CONCLUSION

Les informations dont nous disposons ne sont pas suffisantes pour savoir si les molécules d'atrazine adsorbées sont neutres ou sous forme de cation. Néanmoins, ces premiers résultats expérimentaux conduisent aux conclusions suivantes :

— l'adsorption de l'atrazine sur les argiles Al chauffées se fait essentiellement sur les surfaces externes ;

— l'aluminium joue un rôle prépondérant ;

— les molécules d'eau adsorbées sont responsables de la fixation des molécules d'atrazine ;

— l'adsorption semble liée à la réalisation d'un état de surface dépendant à la fois de la présence d'aluminium et d'un arrangement particulier des molécules d'eau d'hydratation.

Ces données revêtent un intérêt particulier dans l'étude des propriétés physico-chimiques des sols en raison du rôle important joué par l'aluminium.

Reçu pour publication en novembre 1975.

SUMMARY

ADSORPTION OF ATRAZINE ON ALUMINIUM SATURATED MONTMORILLONITES

The adsorption of atrazine on aluminium saturated montmorillonites depends on the thermic treatment of the mineral before the adsorption. As the heating temperature increases, the amount of atrazine adsorbed increases and reach a maximum for temperatures about 250-300°C. The adsorption on the mineral heated at 300°C is studied in more details. The examination of the effects of acidity, of the solvent composition and of the presence of mineral cations shows that :

— the adsorption does not take place through an ion exchange mechanism,
— the aluminium plays a great part but must be hydroxylated,
— the water molecules are directly involved in the adsorption mechanism.

It appears also that the atrazine molecules are essentially adsorbed on the external surfaces of the clay.

ZUSAMMENFASSUNG

ADSORPTION VON ATRAZIN DURCH ALUMINIUMGESÄTTIGTE MONTMORILLONITEN

Die Adsorption von Atrazin durch den aluminiumgesättigten Montmorillonit hängt von der thermischen Behandlung des Minerals vor der Adsorption ab. Wenn die Erhitzungstemperatur steigth, erhöht sich auch die Menge von adsorbierter Atrazin, die ein Maximum für Temperaturen zwischen 250 und 300°C erreicht. Die Adsorption auf das auf 300°C erhitze Mineral wird gründlich untersucht. Die Analyse der Wirkungen des Saüregehalts, der Lösungsmittelzusammensetzung des Vorhandenseins von Mineralkationen erweist dass :

— die Adsorption nicht aus Ionenaustausch hervorgeht,
— Aluminium eine ausschlaggebende Rolle spielt, aber sich als Hydroxyl vorfinden soll,
— die Wassermolkülen in den Adsorptionsmechanismus unmittelbar eingreifen.

Schliesslich erscheint es dass die Atrazinmolkülen hauptsächlich auf der äusseren Oberfläche des Tons angebunden sind.

РЕЗЮМЕ

Адсорбция атразина на алюминиевых монмориллонитах.

Р. КАЛЬВЕ, Мартина ТЕРСЕ.

Адсорбция атразина на монмориллоните насыщенном алюминием зависит от термической обработки минерала перед адсорбцией. При повышении температуры этой обработки количество адсорбированного атразина тоже увеличивается, достигая максимальных величин для температур приближающихся к 250-300 °Ц. Адсорбция на минерале,

температура которого была доведена до 300 °Ц изучается более подробно отдельно. Изучение эффектов кислотности, состава растворитєля и присутствия минеральных катионов, показывает что :

— адсорбция эта независима от ионнообмена;

— алюминий играет решающую роль, когда он находится в гидроксильной форме;

— молекулы воды принимают прямое участие в механизме адсорбции;

И, наконец, выяснено что молекулы атразина закрепляются главным образом на внешней поверхности глины.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bailey G. W., White J. L., Rothberg T., 1968. Adsorption of organic herbicides by montmorillonite. Role of pH and chemical character of adsorbate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 222-234.

Brown C. B., White J. L., 1969. Reaction of 12 s-triazine with soil clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 863-867.

Calvet R., Prost R., 1971. Cation migration into empty octaedral site and surface properties of clays. *Clays and clay minerals*, **19**, 175-186.

Calvet R., Tercé M., Le Renard, 1975. Cinétique de dissolution dans l'eau de l'atrazine, de la propazine et de la simazine. *Weed Res.*, **15**, 351-356.

Giles C. H., McEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D., 1960. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific areas of solids. *J. Chem. Soc.*, III, 3973-3993.

Hance R. J., 1965. Observations on the relationship between the adsorption of diuron and the nature of the adsorbent. *Weed Res.*, **5**, 108-114.

Hance R. J., 1971. Complex formation as an adsorption mechanism for linuron and atrazine. *Weed Res.*, **11**, 106-110.

Harris C. I., Warren G. F., 1964. Adsorption and desorption of herbicides by soil. *Weeds*, **12**, 120-126.

Huang P. M., Lee S. Y., 1969. Effect of drainage on weathering transformations of mineral colloïds of some canadian prairie soils. *Proc. of the Int. Clay Conf. Tokyo*, **1**, 541-551.

Mering J., Glaeser R., 1967. Réarrangement structural de la montmorillonite-Li sous l'effet du chauffage. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 1153-1156.

Mortland M. M., 1968. Protonation of compounds at clay mineral surfaces. *9th Int. Cong. Soil Sci.*, Adelaïde, **1**, 691-701.

Mortland M. M., Farmer V. C., Russel J. D., 1969. Reactivity of montmorillonite surfaces with weak organic bases. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 818-8.

Rich C. I., 1968. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. *Clays and Clay minerals*, **16** (1), 15-31.

Russel J. D., Cruz M. I., White J. L., 1968. The adsorption of 3-aminotriazole by montmorillonite. *J. Agr. Food chem.*, **16** (1), 21-24.

Talbert R. E., Fletchall O. H., 1965. The adsorption of some s-triazines in soils. *Weeds*, **13**, 46-52.

Tercé M., Calvet R., 1974. Adsorption de l'atrazine sur des argiles biioniques Ca-Al. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **279**, 1859-1862.

Vallet M., Calvet R., Chaussidon J., 1973. Remarques complémentaires sur quelques aspects physico-chimiques de l'adsorption de l'atrazine par les montmorillonites. *Proc. Eur. Weed Res. Coun. Symp. Herbicides-Soil*, 41-50.

Van Bladel R., Moreale A., 1974. Adsorption of linuron and monuron (substituted ureas) by two montmorillonite clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **38**, 244-249.

Ward T., Holly K., 1966. The adsorption of triazines by model nucleophiles as related to their partitionning between water and cyclohexane. *J. of coll. and Int. of Sci.*, **22**, 221-230.

Ward T. M., Weber J. B., 1968. Aqueous solubility of alkylamino-s-triazines as a function of pH and molecular structure. *J. Agr. Food chem.*, **16** (6), 959-961.

Ward T. M., Weber J. B., 1969. Ultraviolet absorption spectra of alkylamino-s-triazines. *Spec. chem. Acta.*, 25 A, 1167-1176.

Weber J. B., 1970. Adsorption of s-triazine by montmorillonite as a function of pH and molecular structure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 401-404.

Ann. agron., 1975, **26** (6), 709-740.

ÉTUDE GLOBALE DE LA CULTURE DE LA BETTERAVE A SUCRE SUR LE PÉRIMÈTRE DU HAUT CHÉLIFF

I. — Analyse factorielle des correspondances

A. P. CONÉSA [1], M. ROUX, P. BAILLON, D. HADJ-MILOUD, C. MAGINIEAU et G. LEMAIRE

avec la collaboration des étudiants de l'I.N.A. (El-Harrach) promotion 1969-1973

Laboratoire d'Agriculture,
Institut national agronomique d'Algérie,
El-Harrach (Algérie)

RÉSUMÉ

L'étude globale des relations entre les rendements en betterave à sucre et les variables (qui caractérisent le milieu, les techniques ou les plantes) permet de mettre en lumière les facteurs qui réduisent la production. Elle pose le problème du traitement statistique simultané de variables discrètes et continues. Dans un premier temps, l'analyse factorielle des correspondances a mis en lumière les relations rendements en racines, variables explicatives liées à la physique du sol (stabilité structurale en particulier), à la rotation (date de labour, salinisation des sols, choix des variétés) et à la nutrition (eau, phosphore, bore et cations tels que Ca, Mg, Na et K).

INTRODUCTION

A la demande du Commissariat chargé de la mise en valeur du Haut Chéliff, le laboratoire d'Agriculture de l'I.N.A. d'El-Harrach, a entrepris une étude globale de la production de betteraves à sucre sur le périmètre.

Les objectifs du plan de développement prévoient une extension de cette culture destinée à satisfaire, en partie, les besoins de l'Algérie (240 000 tonnes de sucre en 1970), tout en augmentant l'emploi de la main-d'œuvre.

[1] I.N.R.A., Département d'Agronomie, détaché au Laboratoire d'Agriculture de l'I.N.A. d'Algérie (El-Harrach). Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 68021 Colmar.

La mise en valeur de la plaine du Haut Chéliff s'est organisée au moment de la mise en place du réseau d'irrigation et de la sucrerie à Sidi Lakdar, près de Khémis-Miliana. Cette usine peut traiter 150 000 tonnes de racines par an. La production du périmètre de mise en valeur, 70 000 tonnes de racines en moyenne, alimente partiellement l'usine.

Les rendements en grande culture sur le périmètre sont, avec des moyennes de 25 t/ha de racines, encore éloignées des résultats obtenus expérimentalement à la station agronomique de l'I.N.R.A.A. d'El-Khémis. Celle-ci obtient en moyenne 65 tonnes de racines/ha. Il existe toujours un décalage entre les performances d'essais réalisés dans des conditions optimum et les résultats de « la production ». La connaissance des facteurs du milieu qui limitent les rendements permet de corriger la situation et de réduire l'écart entre les résultats en grande culture et les potentialités révélées par l'expérimentation. Plusieurs facteurs (liés au milieu, aux techniques), expliquent les variations de rendements qu'on peut constater sur le périmètre. Pour étudier un tel système multidimensionnel (GRAS, 1971), pour appréhender l'ensemble des facteurs et leurs interrelations, on est donc conduit à adopter une démarche globale.

Le recueil des données, par voie d'enquête, fournit une masse de variables quantitatives et qualitatives, dont le traitement statistique simultané n'est pas aisé (GRAS *et al.*, 1971).

Notre étude se fixait plusieurs objectifs :

— sur un plan pratique, essayer de répondre, au moins partiellement, aux problèmes que se posent les responsables techniques du périmètre de mise en valeur ;

— sur un plan méthodologique, tenter une approche globale de la culture à l'aide de méthodes statistiques nouvelles ; en particulier, il s'agissait de traiter simultanément les variables quantitatives et qualitatives ;

— sur un plan pédagogique, notre laboratoire ayant une fonction d'enseignement, promouvoir des méthodes pédagogiques actives permettant d'associer les étudiants au processus de développement.

L'enquête sur le terrain a eu lieu pendant la campagne 1970-1971, le traitement statistique en 1971-1972, les recherches sectorielles complémentaires en 1972-1973.

I. — LA RÉGION ÉTUDIÉE, MÉTHODOLOGIE DE L'ENQUÊTE

1. 1. — *Le périmètre de mise en valeur du Haut Chéliff*

La culture de la betterave a été implantée dans la plaine d'El-Khémis qui se trouve à 120 km au Sud-Est d'Alger. Cette plaine, située à 300 m d'altitude, est traversée d'Est en Ouest, par l'Oued Chéliff.

1. 1.1. *Morphologie.*

La plaine du Haut Chéliff peut être subdivisée en 4 grandes unités :

— lit majeur du Chéliff et de ses affluents ;
— plaine proprement dite, constituée par une terrasse récente ;
— cône de déjection de l'Oued, formant des glacis d'accumulation ;
— terrasse et portion d'ancien glacis.

La plaine proprement dite, unité morphologique la plus vaste, est formée par des sols peu évolués ou brun calcaire qui peuvent être vertiques. Les sols rouges méditerranéens se rencontrent sur les terrasses et les portions d'anciens glacis.

1. 1.2. *Climatologie.*

Le bassin du Haut Chéliff, coupé de l'influence tempérée de la mer par la chaîne du Dahra, possède un climat méditerranéen à caractère continental accentué.

Sur la figure 1, nous avons représenté les principales caractéristiques climatiques.

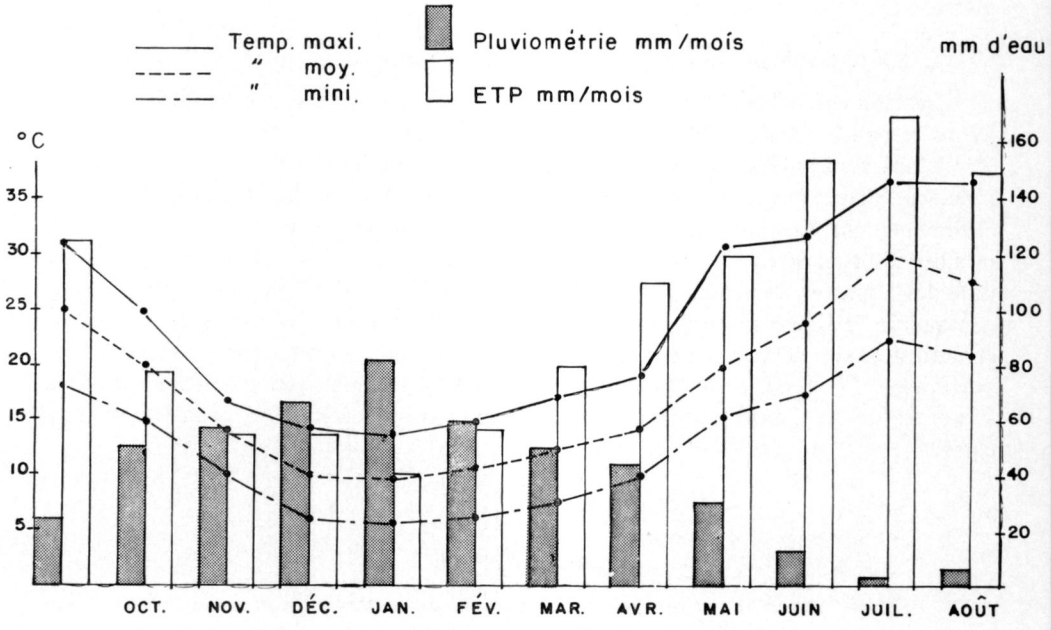


FIG. 1. — *Moyennes climatiques régionales*

Les périodes de végétation les plus favorables sont courtes et l'on passe rapidement des froids hivernaux avec minima très bas, aux chaleurs de l'été avec maxima excessifs, ce qui diminue la période de végétation active de la Betterave.

Les déficits hydriques théoriques estimés à partir de la différence : P — ETP, sont couverts en partie par l'irrigation avec l'eau du barrage du Ghribs. En 1970, 5 000 ha environ étaient irrigués.

1. 2. — *Méthodologie*

1. 2.1. *L'échantillonnage et la collecte des données.*

La constitution de l'échantillonnage pose un problème ardu lié à l'antagonisme entre la nécessité de prendre en compte un grand nombre de points d'observation (sécurité statistique) et les moyens (temps en particulier) dont on dispose pour effectuer ces observations.

L'enquête ayant pour objectif d'expliquer les différences de rendements observées sur le terrain, nous avons effectué une stratification de l'échantillon de manière que soient représentés :

— les grands types de sols du périmètre en prenant pour base la carte pédologique de la région établie par BOULAINE (1956) ;

— les différentes classes de rendements. Ne pouvant prévoir ces rendements, nous avons tenu compte, pour constituer notre échantillon, des rendements en betteraves obtenus sur les exploitations les années précédant l'enquête ;

— les divers précédents de la betterave (blé, fourrages, betteraves, etc.).

L'ensemble des observations a porté sur 95 stations réparties à travers le périmètre.

1. 2.1.1. *Observations en plein champ sur les stations.*

Les données collectées portaient sur une station de 14,4 m² ; c'est-à-dire que nous avons retenu la méthode utilisée par GRAS *et al.* (1971).

L'observation du sol en profondeur et de l'enracinement de la betterave est précieuse pour l'étude des effets du travail du sol et des accidents structuraux sur l'enracinement. Ces observations sont cependant délicates et, compte tenu du grand nombre d'observateurs (étudiants), nous avons obtenu des résultats hétérogènes difficiles à traiter. Cependant, au moment de la récolte, nous avons compté le pourcentage de betteraves fourchues. Ces données révèlent, en partie, l'effet des accidents structuraux sur l'enracinement. Nous avons également compté, sur les stations, les betteraves non marchandes (diamètre < 45 mm) qui dépendent partiellement de la structure du sol ; enfin, la longueur des racines a été mesurée et répartie en trois classes :

(< 10 cm)
(10-15 cm)
(> 15 cm)

— Pour tenter d'appréhender *la compétition interspécifique*, nous avons, du 1er au 15 avril, essayé de caractériser le degré de salissement des stations (très sale, peu sale, propre). Nous avons complété cette première observation par une pesée des mauvaises herbes prélevées à la périphérie des stations (pesée effectuée le 10 juin, sur une surface de 4 m²).

— La densité moyenne des betteraves par station ne donne qu'une idée approximative de la *compétition intraspécifique* ; en effet, on peut obtenir une même densité pour des betteraves distribuées régulièrement ou au contraire irrégulièrement.

C'est pourquoi nous avons complété l'appréciation de la densité par l'indice de dispersion I_D.

$$I_D = \frac{\sigma^2}{\bar{x}}$$

où σ^2 représente la variance et $\bar{x}$ la moyenne du nombre de betteraves au mètre.

— si $I_D > 1$, on a une distribution contagieuse ;
— si $I_D = 1$, la distribution des betteraves est « aléatoire », ce qui peut traduire un semis, une levée irrégulière ou un démariage mal fait ;

— au contraire, si $I_D < 1$, la distribution est plus régulière et correspond à un faible niveau de variabilité du nombre de plantes par mètre ;

— si $I_D = 0$, la population est parfaitement régulière.

— Sur l'asperseur le plus proche de la station, nous avons mesuré la pression réelle afin d'apprécier les pluviométries horaires et les *quantités d'eau apportées sur les stations*. Cette appréciation a été complétée par une mesure de l'humidité (un jour avant et un jour après irrigation) des horizons :

(0-10 cm)
(10-30 cm)
(30-50 cm).

Nos résultats représentent la moyenne de deux prélèvements effectués en deux points de la station.

— En 1971, la seule *attaque parasitaire* importante était celle de la casside. Nous avons noté sur chaque station le degré d'infestation (pas d'attaque, faible attaque, forte attaque).

— Les rendements en racines à la récolte ont été mesurés un rang sur deux, soit sur 7,2 m², puis ramenés à 14,4 m².

1. 2.1.2. *Mesures en laboratoire.*

Les échantillons de sols destinés à l'analyse physico-chimique, ont été constitués à partir de 4 prélèvements par station effectués entre 0 et 30 cm en mars 1971.

Sur ces échantillons ont été pratiqués :

— l'analyse granulométrique (dispersion par un appareil à ultra-son et prélèvements à la pipette Robinson) ;

— la mesure de l'humidité équivalente en laboratoire. Après saturation en eau, les échantillons sont soumis à une force centrifuge de 1 000 g pendant 30 minutes. Après centrifugation, on mesure l'humidité ;

— l'azote total a été dosé après minéralisation de l'azote organique (méthode Kjeldahl) ;

— la capacité d'échange a été évaluée par la méthode à l'acétate d'ammonium ;

— le phosphore assimilable a été évalué par la méthode JORET-HÉBERT (1955) ;

— les tests de stabilité structurale et de perméabilité ont été pratiqués sur des échantillons de sol prélevés spécialement sur chaque station (0-15 cm). La stabilité structurale est caractérisée par deux indices :

— un indice Is qui caractérise l'instabilité des sols ;

— un indice K qui caractérise la perméabilité moyenne sur échantillon remanié, différente de la perméabilité *in situ* (HÉNIN *et al.*, 1969).

L'analyse foliaire a été effectuée sur des échantillons prélevés 130 jours après la levée. 60 limbes foliaires de betteraves ont été prélevés sur chaque station, en choisissant des feuilles intermédiaires entre les jeunes feuilles et le verticille extérieur, selon la méthode d'ULRICH *et al.* (1959) ; les dosages ont été effectués sur la solution de reprises des cendres par HNO_3, après calcination à 500°C des limbes lavés à l'eau distillée, séchés à 105°C, puis broyés.

— N dans les feuilles a été dosé par la méthode Kjeldahl ;

— K et Na ont été dosés par photométrie d'émission ; Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, par photométrie d'absorption atomique ;
— le phosphore a été dosé sur la solution de reprise des cendres par colorimétrie du complexe phosphovanado-molybdique à 4 200 Å ;
— le bore a été dosé par colorimétrie.

L'analyse des racines.

Le taux de sucre a été dosé dans les racines par saccharimétrie.

1. 2.1.3. *Collecte des données au niveau des domaines.*

L'examen du calendrier de travail du sol, le dépouillement des fiches de paie, l'interview des agents techniques et des chefs betteraviers des domaines, nous ont permis de compléter notre information :

— nature du précédent de la culture (betterave, vigne, vesce avoine, céréales, jachère) ;
— date de pré-irrigation, si nécessaire ;
— date de labour ;
— date de semis (nous n'avons pu noter l'écart semis-levée) ;
— variétés (Zwann Poly, KWSAA, Megapoly 2, Maribo Maroc Poly, Polybeta, Maribo Magna Poly) ;
— date de première irrigation ;
— date du premier binage ;
— date de démariage.

1. 2.2. *Dépouillement.*

1. 2.2.1. *Les histogrammes représentent* une première mise en forme des résultats ; pour toutes les variables quantitatives, nous avons calculé les valeurs moyennes et les écarts-types.

1. 2.2.2. *Pour étudier les relations des variables* 2 à 2, nous avons calculé :

— les coefficients de corrélation de PEARSON pour les variables quantitatives ;
— dans le cas des variables qualitatives, nous avons établi les tables de contingence et calculé les tests du χ^2.

1. 2.2.3. *Analyses multivariées.*

Deux types de méthodes d'analyses des données ont été utilisés :

— analyse factorielle des correspondances, qui permet une approche de l'ensemble des variables étudiées ;
— méthodes de régression qui permettent, pour les variables quantitatives, une analyse statistique plus fine.

Dans ce premier article, nous traiterons des résultats obtenus à partir de l'analyse des correspondances.

L'analyse factorielle des correspondances.

L'analyse préalable des teneurs en sucre des racines donnant des résultats peu clairs par suite du faible écart entre les valeurs extrêmes de ces teneurs, nous nous limiterons à l'exposé des résultats qui concernent les rendements en racines.

La méthode statistique d'analyse multidimensionnelle destinée à analyser la masse des données collectées impliquait, pour trouver les variables qui influençaient le plus le rendement, de faire jouer un rôle particulier au rendement.

Nous ne pouvions pas analyser le tableau des données brutes dont les lignes sont les observations (ici les stations) et les colonnes, les différentes variables, car le rendement aurait été « noyé » dans la masse des autres variables puisque considéré comme une variable ordinaire. Son rôle, dans la discrimination des stations, pouvait bien être secondaire par rapport aux autres variables.

C'est pour que ce rôle devienne prépondérant, quant à la sélection des variables, que nous avons constitué le tableau I.

TABLEAU I

Variables explicatives	Modalités	TO_1	TO_2	TO_3	TO_4	TO_5	TO_6	$k(i)$
Variétés	VA_1 (Zwanpoly)	0	1	2	9	3	3	18
	VA_2 (KWSAA)	1	4	1	2	0	1	9
	VA_3 (Mégapoly 2)	0	7	6	3	5	1	22
	VA_4 (Maribo Maroc Poly 4)	1	0	0	3	3	0	4
	VA_5 (Polybêta 5)	3	4	3	8	4	0	22
	VA_6 (Maribo Magna Poly 6)	1	2	7	2	4	1	17
	$k(j)$	6	17	19	27	19	6	$95 = k$
Betteraves non marchandes	NM_1 (0-20,6 %)	0	1	5	16	12	5	
	NM_2 (20,6-41,0 %)	1	11	12	10	7	1	
	NM_3 (41-61,5 %)	2	5	2	1	0	0	
	NM_4 (61,5-82,6 %)	3	1	0	0	0	0	
Bore dans la plante	B_1 (28,6-35,5 p.p.m.)	2	5	8	5	2	1	
	B_2 (35,5-42,4 p.p.m.)	2	7	8	13	10	2	
	B_3 (42,4-49,3 p.p.m.)	2	5	3	7	5	1	
	B_4 (49,3-56,1 p.p.m.)	0	1	0	2	2	2	
Agrégats stables à l'alcool (%)	A_1 (< 23,25 %)	2	6	4	4	7	0	
	A_2 (23,25-40,5 %)	3	7	11	14	6	2	
	A_3 (40,5-57,75 %)	1	5	4	9	6	3	
	A_4 (57,75-75 %)	0	0	0	0	0	1	

Nous avons d'abord, d'après l'histogramme des rendements, sélectionné 6 classes de rendements :

$$TO_1, \ldots, TO_6$$

De même, nous avons divisé les autres variables quantitatives en classes ou modalités.

Ayant ainsi obtenu un nouvel ensemble de variables discrètes (modales), nous avons établi le tableau 1, où, à l'intersection de la ligne i et de la colonne j, se trouve $k(i, j)$ qui est le nombre de stations présentant la modalité i de la variable considérée et la classe de rendement j.

Par exemple, pour l'extrait du tableau reproduit ci-dessous :

$$i = 3(VA_3),\ j = 3(TO_3),\ k(i, j) = 6$$

Pour la variété VA_3 (Mégapoly 2), il y a 6 stations qui ont donné un rendement de classe 3.

Ce tableau 1 permet de mettre en correspondance ce qu'il est convenu d'appeler le second ensemble J, associé aux colonnes (les rendements) et le premier ensemble I associé aux lignes (qui est formé par la réunion des modalités de toutes les autres variables prises en compte).

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) est comme l'analyse en composante principale (ACP) une méthode multivariante, mais elle est plus spécialement adaptée au traitement de données telles que celles du tableau 1 (Cordier, 1965 ; Benzécri, 1973).

Si nous convenons d'appeler $k(i)$ et $k(j)$ respectivement la somme de la $i^{ième}$ ligne et de la $j^{ième}$ colonne (pour une variable donnée), la somme k des $k(i)$ et $k(j)$ représente le nombre total de stations étudiées.

Au lieu de porter sur les valeurs $k(i, j)$, l'analyse va porter sur les fréquences $f(i, j) = k(i, j)/k$. De même, $f(i)$ et $f(j)$ sont les fréquences marginales ; $f(i)$ représente la fréquence de la modalité i, $f(j)$ la fréquence de la classe de rendement j.

L'analyse factorielle étudie les profils des différentes modalités ; le profil de la modalité i est l'ensemble des 6 valeurs $f_j^i = \dfrac{f(i, j)}{f(i)}$, pour j variant de 1 à 6.

Notons que 2 lignes qui ont des fréquences $f(i, j)$ proportionnelles ont même profil car on fait abstraction de la fréquence $f(i)$. Alors qu'en analyse en composante principale, la distance entre 2 lignes x et y est la distance euclidienne usuelle $\sum_j [f(x, j) - f(y, j)]^2$, en analyse factorielle des correspondances, la distance $d^2(x, y)$ entre ces deux lignes est la distance du χ^2 centrée sur la loi marginale du second ensemble j entre leurs profils :

$$d^2(x, y) = \sum_j (f_j^x - f_j^y)^2 / f(j)$$

c'est-à-dire que, dans cette distance, n'interviennent pas les $f(i)$ et que l'on prend comme référence la répartition moyenne des rendements. De plus, chaque modalité est affectée d'un poids qui n'est plus 1 comme en ACP mais sa fréquence $f(i)$.

On peut se représenter les différentes modalités ou points du 1er ensemble comme un système de points matériels dans un espace de dimensions 6 : la masse de chaque point étant une fréquence $f(i)$ et sa position étant donnée par son profil, on parle

alors du nuage N (I) des points P_i. Le but de l'analyse factorielle est de donner une représentation simplifiée dans un espace de dimension plus faible V (en général 1, 2 ou 3), la plus proche possible du nuage original où le critère de qualité est le suivant : à un point P_i du nuage, on associe sa projection orthogonale sur V : H_i et on minimise la quantité $\sum_i f(i)$. $P_i H_i^2$ qui n'est autre que la somme des carrés des distances des points P_i à l'espace V cherché, chaque terme étant pondéré par la masse du point P_i correspondant. Elle mesure l'ajustement de V au nuage N(I). Remarquons qu'en conséquence, l'analyse prend en compte non seulement le profil mais aussi la fréquence $f(i)$.

On montre que V passe par le centre de gravité G du nuage et que le problème revient à minimiser : $\sum_i f(i)\ G_iH_i^2$; cette quantité généralise la variance et s'appelle l'inertie. La solution est obtenue grâce aux axes principaux d'inertie que l'on appelle facteurs : on cherche le premier facteur F_1 d'inertie maximale, puis parmi les axes perpendiculaires à F_1, celui qui est d'inertie maximale F_2 ; puis un troisième, perpendiculaire au plan formé par les deux premiers F_1 F_2 et ainsi de suite. Pratiquement, on les obtient en extrayant les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice d'inertie qui remplace ici la matrice de variance-covariance de l'ACP.

Les projections H_i des points dans le plan factoriel F_1F_2, donnent une carte où l'éloignement des points correspond à une dissimilitude des modalités et où leur proximité, si les points ne sont pas trop éloignés du plan F_1F_2, indique une ressemblance. Remarquons que tout ce qui a été fait avec le premier ensemble I, nous pouvons aussi le faire avec le 2e, définir de même le profil :

$$f_i^j = \frac{f(i, j)}{f(j)} \qquad i = 1, \ldots n, \text{ le poids } f(j)$$

la distance $d^2(x, y) = \sum_i (x_i - y_i)^2/f(i)$ et, de la même façon, l'inertie. Le fait remarquable en analyse factorielle des correspondances est qu'elle respecte la symétrie entre les deux ensembles et que les facteurs D_i obtenus pour l'analyse du second ensemble sont, à 1 coefficient près, les facteurs F_i obtenus pour le premier.

De plus il est possible de projeter les points du 1er et 2e ensemble dans le même plan factoriel, mettant ainsi en évidence les liaisons entre rendements et modalités grâce au principe barycentrique (Benzécri, 1973).

Dans notre étude, nous nous sommes limités au premier plan déterminé par F_1F_2 ou (D_1D_2) car si les différents facteurs sont non corrélés entre eux (corrélation étant pris au sens relatif à l'inertie et non à la variance), il ne sont pas dépourvus de liaisons fonctionnelles : ce qu'on appelle effet Guttman (Benzécri, 1973).

Si nous considérons la carte des projections des modalités des variables sur le premier plan factoriel, par exemple des variétés, une variété V_1 très fréquente, ayant donc une masse élevée, et répartie régulièrement dans les différentes classes de rendements, se trouvera près du centre de gravité, c'est-à-dire de l'origine des axes ; une variété peu fréquente mais donnant les mêmes rendements que V_1, sera voisine de V_1 sur la carte du nuage des variétés donnée par les deux premiers axes factoriels malgré des effectifs beaucoup plus faibles. Au contraire, une variété donnant des rendements très différents se trouvera fort éloignée de l'origine.

Une annexe du programme de calcul autorise, en outre, l'évaluation du rôle que joue chaque point dans la détermination de chacun des axes factoriels, axes qui sont extraits par ordre d'importance décroissante. Ce rôle sera appelé contribution, produit de la fréquence par le carré de la distance du point au centre de gravité. On verra que ces contributions sont plus utiles que les situations géométriques relatives des différents points (modalités).

Les données traitées.

Nous avons pris en compte 72 variables auxquelles correspondaient 290 modalités ; ces variables peuvent être subdivisées en *variables édaphiques* et *biotiques*.

Les *variables édaphiques* sont de deux types :

— les facteurs du rendement (éléments nutritifs, eau, ...) ;

— les conditions du milieu qui règlent l'action des facteurs du rendement.

En effet, pour qu'un facteur du rendement (le bore par exemple) exerce son effet, il faut que les *conditions* du milieu le permettent ; par exemple, dans un sol ayant une teneur en eau suffisante, l'absorption du bore sera facilitée. Ici, l'eau est une condition du milieu. Notons, à ce propos, que l'eau est à la fois un facteur et une condition de la croissance et du développement de la culture.

Les *variables biotiques* concernent la betterave (teneurs en éléments minéraux, caractères morphologiques). Il s'agit là de variables intermédiaires qui influencent les rendements de façon plus directe que les variables édaphiques, comme le soulignent DEFFONTAINES et GRAS (1968).

2. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

2. 1. — *Présentation des variables*

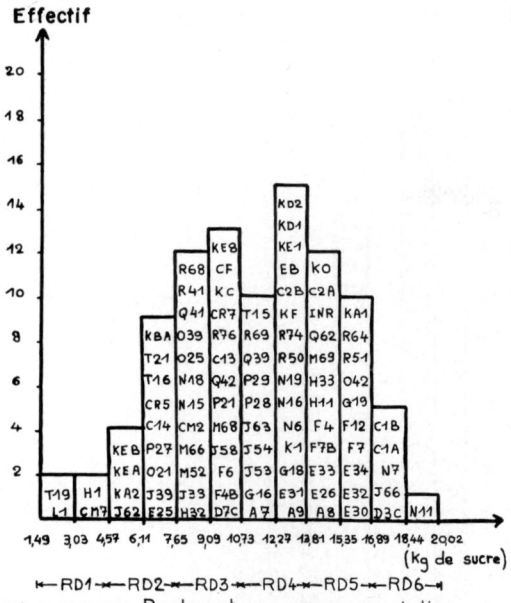
Sur les histogrammes (fig. 2 à 12), nous avons représenté la répartition des différentes stations étudiées pour les variables quantitatives importantes, celles qui apparaissent liées aux rendements comme nous le montrerons (certaines variables comme le phosphore n'ont pas une distribution normale). Les rendements varient de 1,49 à 20 kg de sucre par station (fig. 2).

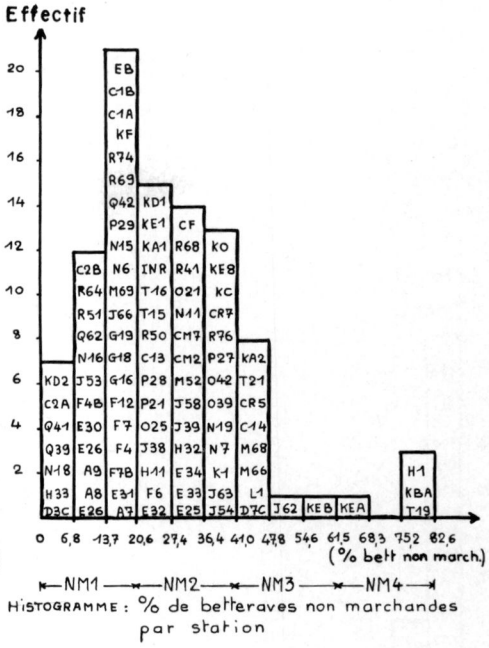
2. 2. — *Liaisons entre variables deux à deux*

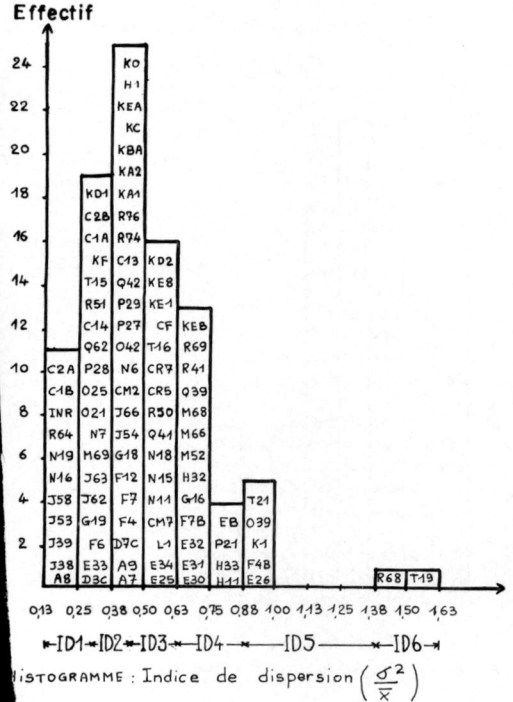
L'examen des corrélations simples entre les différentes variables étudiées (fig. 13) permet de mettre en lumière les relations variables-rendements ainsi que les interrelations entre variables. L'examen de ces corrélations nous permettra de nuancer les résultats de l'analyse multivariée.

2. 3. — *Résultats de l'analyse des correspondances*

Comme nous l'avons déjà signalé, seules les projections sur le premier plan factoriel, axes 1 et 2 ont été considérées. Les premiers résultats concernant ce traitement ont été présentés par ailleurs (CONÉSA *et al.*, 1972).







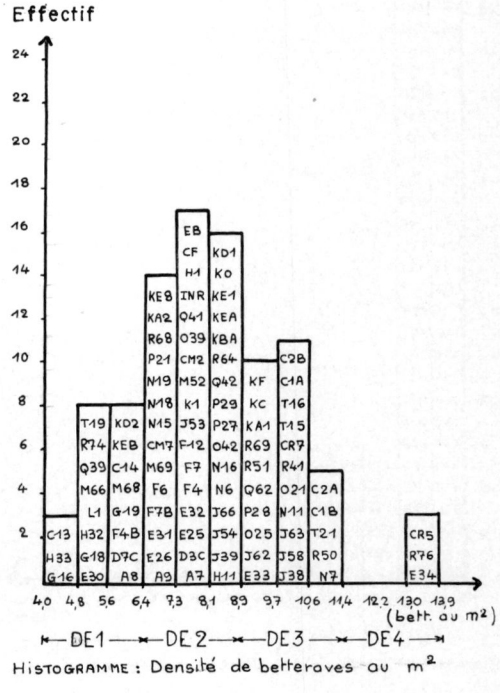
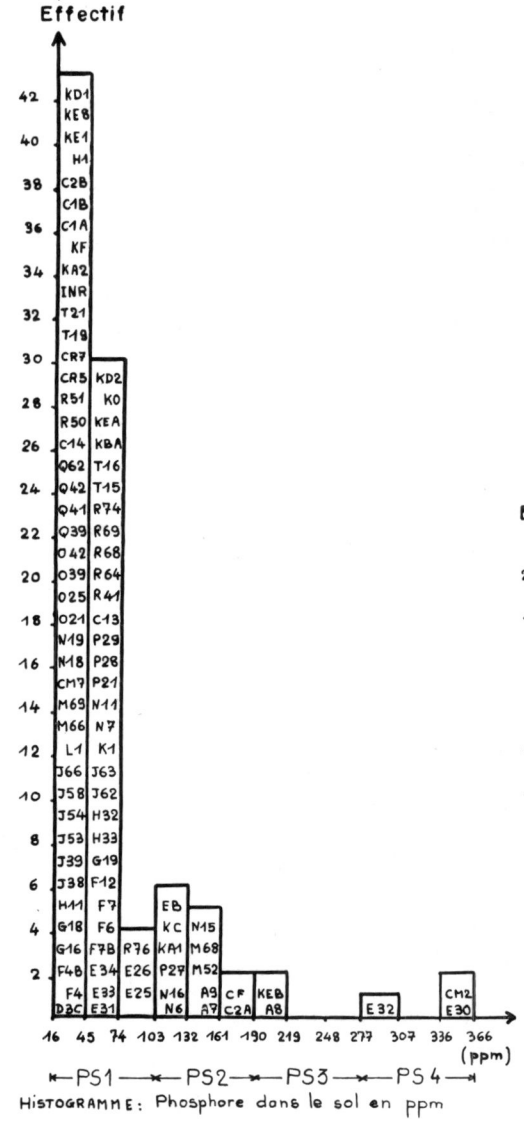
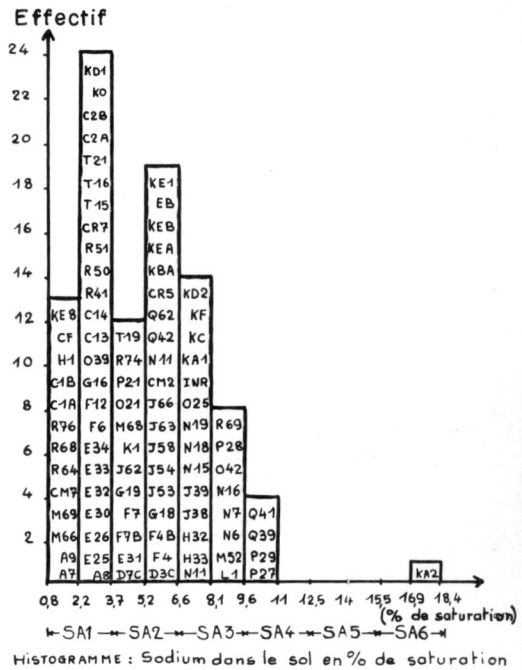


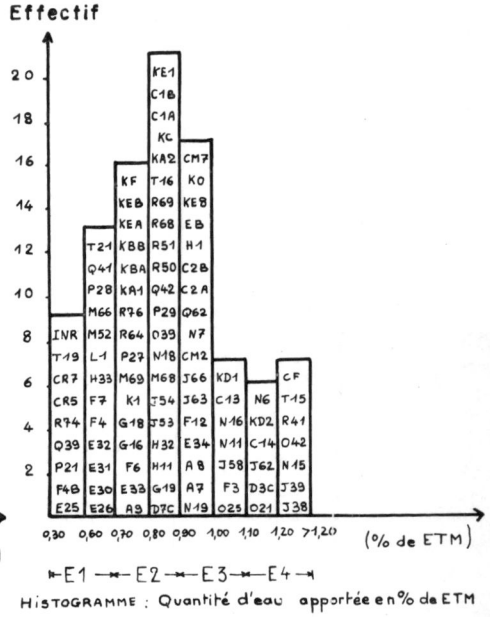
FIG. 2. — *Rendement en sucre par station*
FIG. 3. — *P. 100 de betteraves non marchandes par station*
FIG. 4. — *Indice de dispersion*
FIG. 5. — *Densité de betteraves au m²*



HISTOGRAMME : Phosphore dans le sol en ppm

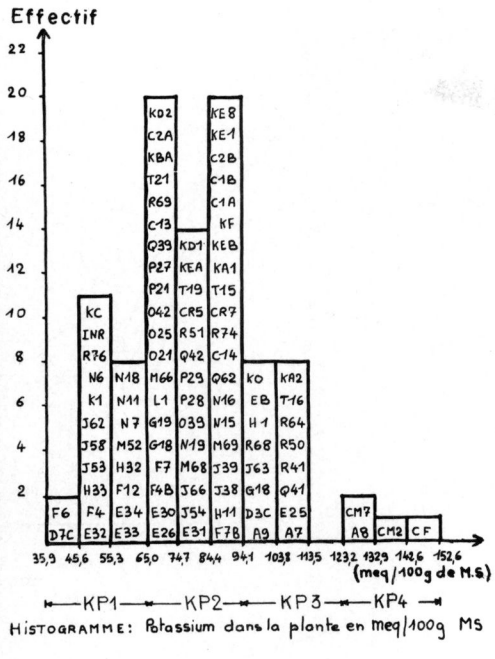


HISTOGRAMME : Sodium dans le sol en % de saturation

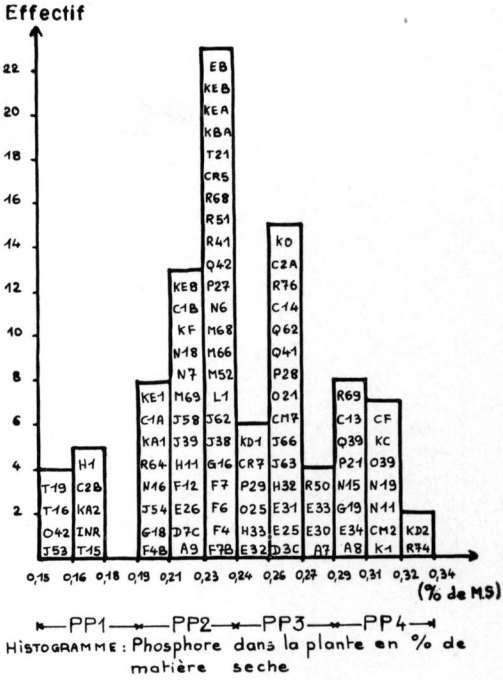


HISTOGRAMME : Quantité d'eau apportée en % de ETM

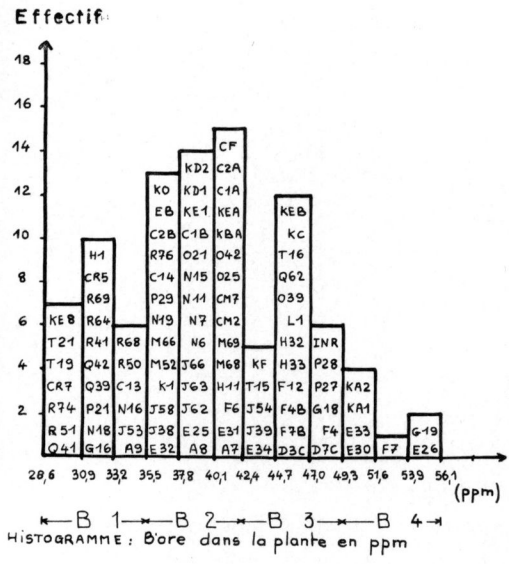
FIG. 6. — *Phosphore dans le sol*
FIG. 7. — *Sodium dans le sol*
FIG. 8. — *Quantité d'eau apportée en p. 100 de l'ETM*



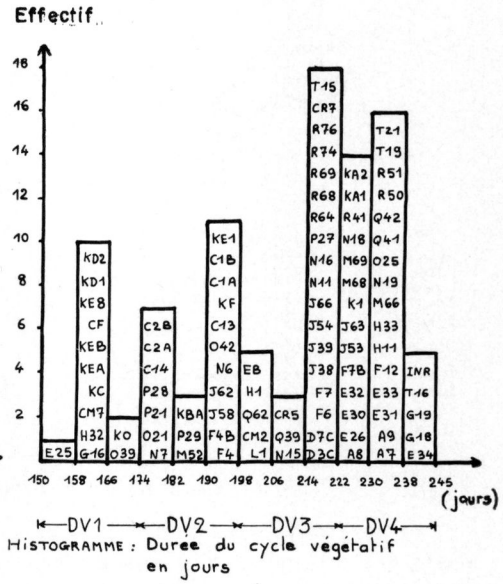
HISTOGRAMME: Potassium dans la plante en meq/100g MS



HISTOGRAMME: Phosphore dans la plante en % de matière seche

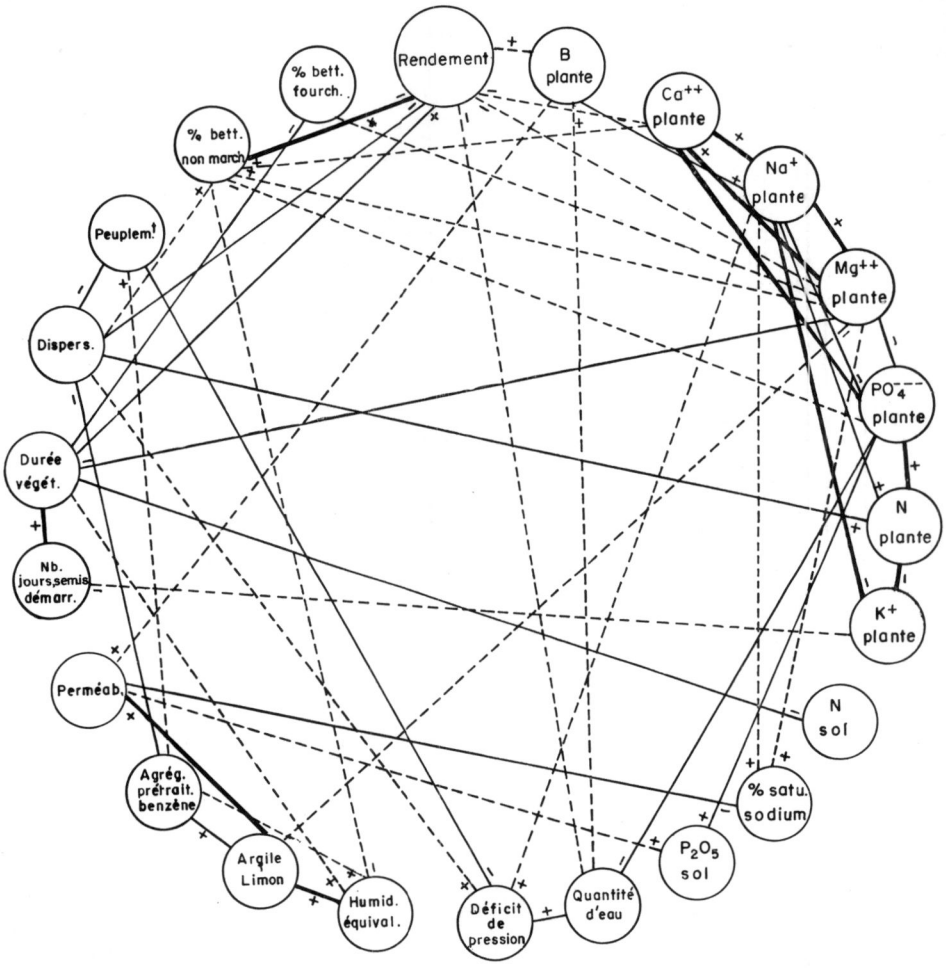


HISTOGRAMME: Bore dans la plante en ppm



HISTOGRAMME: Durée du cycle végétatif en jours

FIG. 9. — *Potassium dans la plante*
FIG. 10. — *Phosphore dans la plante*
FIG. 11. — *Bore dans la plante*
FIG. 12. — *Durée du cycle végétatif*



Seuil de probabilité	r	Représentation
0,05	0,20	----
0,01	0,25	——
0,001	0,34	——

FIG. 13. — *Diagramme des coefficients de corrélation*

2. 3.1. *Projection des modalités du rendement total en racine par station.*

On se trouve en présence de deux paramètres : les coordonnées des différentes modalités du rendement en racines et les contributions de ces différentes modalités à l'inertie de l'axe des rendements. Sur le tableau 2, on constate que ce sont les modalités extrêmes TO_1, TO_2, TO_6 qui jouent le rôle le plus important dans la détermination de l'inertie de cet axe. Ceci est tout à fait naturel quand on sait que le rendement a une distribution empirique unimodale et à peu près symétrique, c'est-à-dire voisine d'une distribution normale. En effet, ceci veut dire que de nombreuses stations ont

un rendement moyen, le centre de gravité ; l'origine des axes factoriels du nuage des classes de rendements sera donc voisin du centre de gravité des classes moyennes dont l'effectif est très nombreux.

TABLEAU 2

Caractérisation des modalités du rendement

Modalités du rendement	Contribution absolue (de la modalité)	Contribution de la modalité en p. 100 de la contribution de l'axe 1	Ordonnée des modalités sur l'axe 1
TO_1	138,0	39,2	0,599
TO_2	72,0	20,6	0,251
TO_3	2,2	0,6	0,042
TO_4	18,0	5,1	— 0,102
TO_5	38,1	16,8	— 0,177
TO_6	83,7	23,7	— 0,467

Contribution de l'axe 1 = 352,7.

Par contre, la direction des axes sera influencée par les points éloignés de ce centre de gravité qui ont, de ce fait, une inertie assez grande.

Les classes du rendement (numérotées TO_1 à TO_6) se répartissent sur la figure 14 suivant une parabole, à l'exception de TO_6.

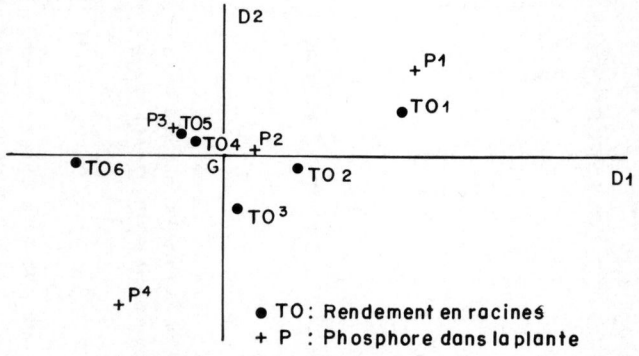
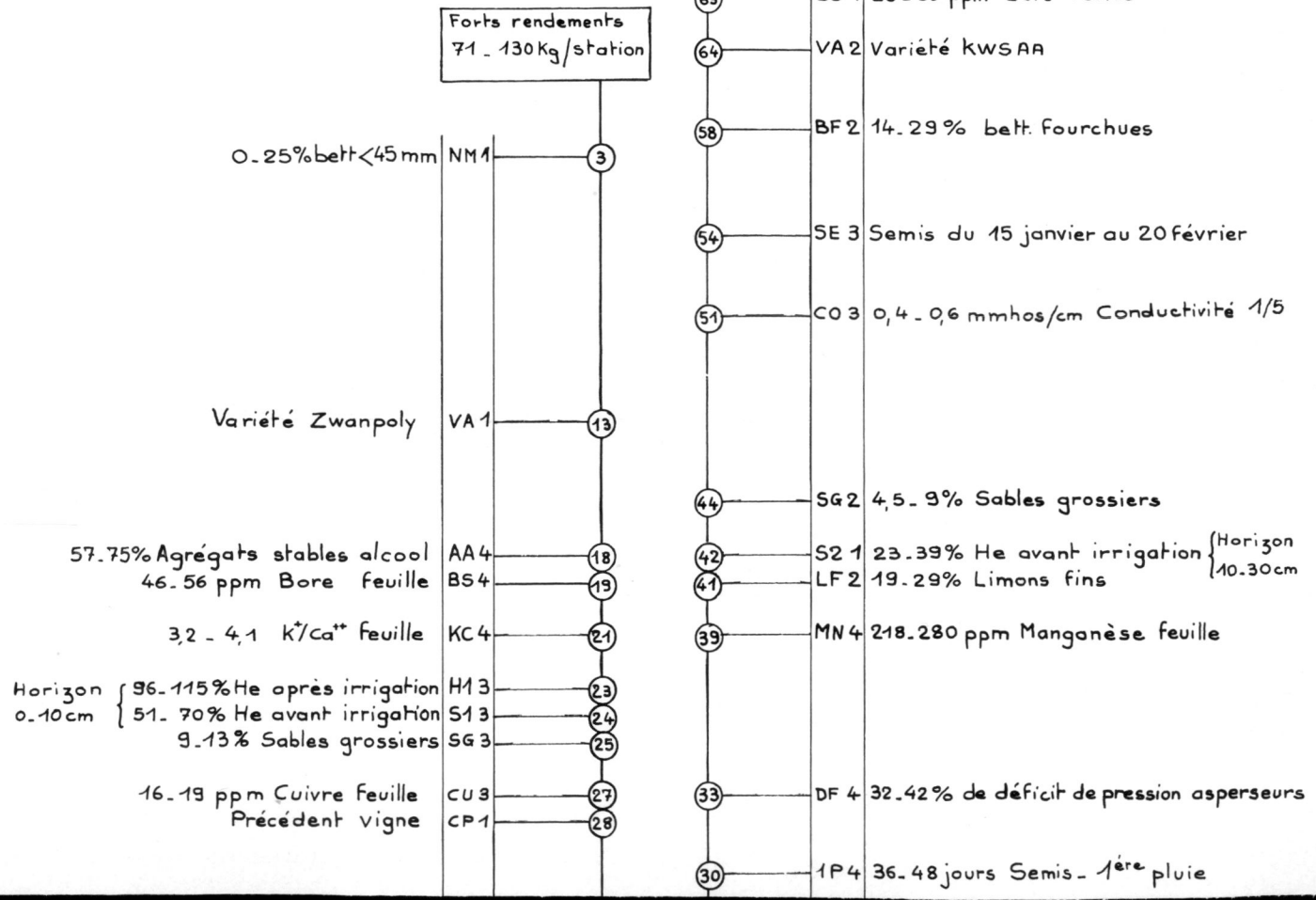


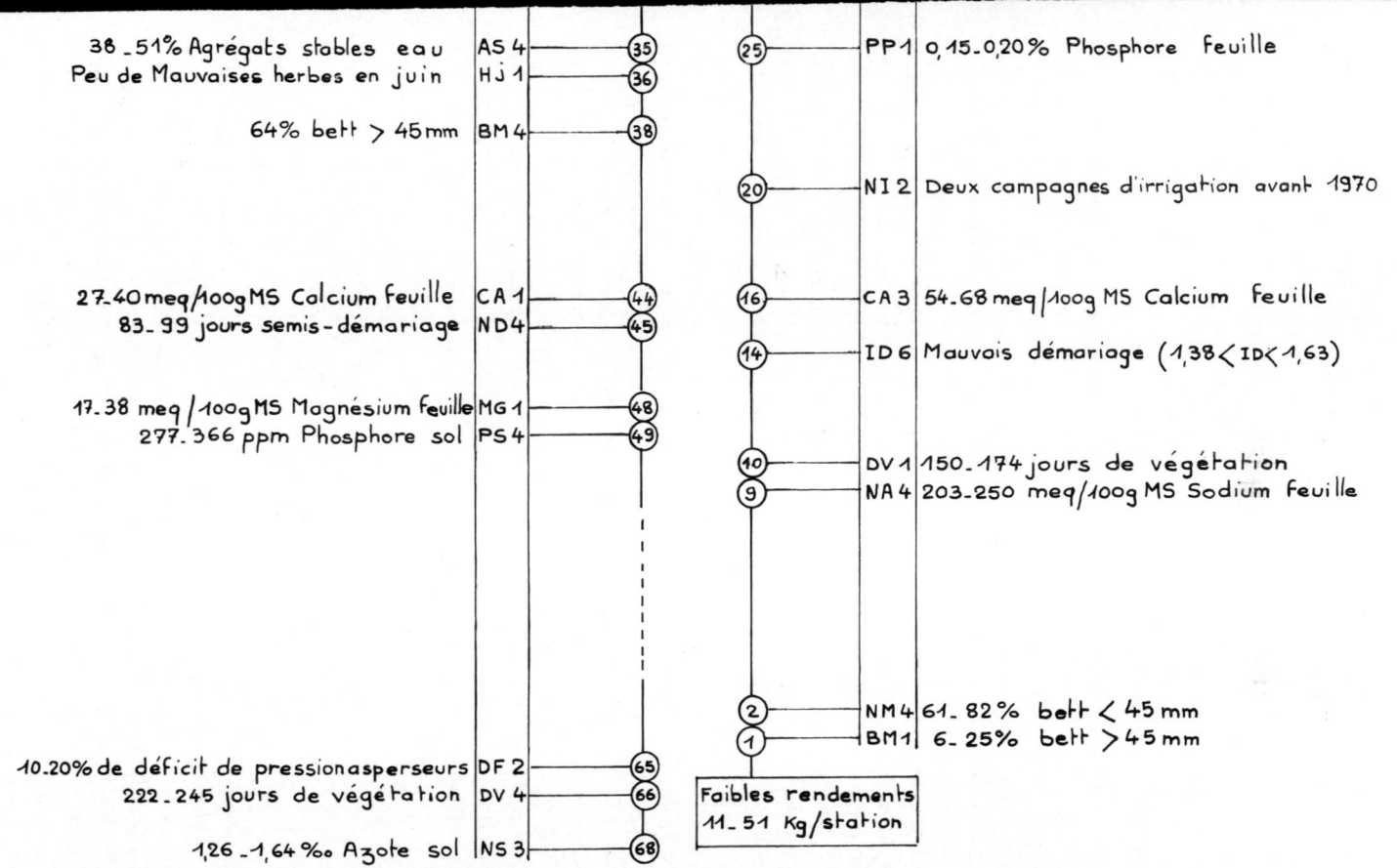
FIG. 14. — *Projections des modalités « rendement en racines » et « teneur en phosphore » sur le 1er plan factoriel*

Cette disposition particulière signifie qu'il y a, grosso modo, liaison linéaire entre les rendements en racines et les variables explicatives proposées.

Les projections, sur l'axe 1, des classes de rendements, sont rangées sans erreur

TABLEAU 3. — *Schéma des variables intervenant sur les forts et faibles rendements en racines*





◯ ordre de la contribution. | | classe de variable, croissante de 1 à 4 sauf SE, HJ: 1 à 3 et SG, ID: 1 à 6

suivant l'ordre des coordonnées décroissantes, ce qui nous conduit à interpréter cet axe comme étant l'axe des rendements.

La situation excentrique de la classe TO_6 nous pose un problème. Les très forts rendements (TO_6) ne s'obtiennent sûrement pas par une simple extrapolation des valeurs des différentes variables contribuant aux rendements moyens, mais plutôt par de nouveaux rapports entre ces variables ou bien, par l'entrée en jeu de certaines variables non prises en compte dans l'enquête.

2. 3.2. *Projection des modalités des variables explicatives.*

L'examen du diagramme homologue de celui de la figure 14 pour les variables explicatives, est difficile et fastidieux à interpréter du fait du grand nombre de points dont il est constitué. Pour la clarté de l'exposé des résultats, nous présenterons le dépouillement par diagrammes partiels, en nous attachant aux variables qui sont apparues comme ayant une influence sur les rendements en racine ou les composantes de ce rendement (betteraves marchandes).

Afin de conserver les proximités entre variables, nous avons regroupé les variables d'un même type (composantes du rendement, physique du sol).

Étant donné l'importance de l'axe 1, démontrée au paragraphe précédent, il est intéressant de contrôler si les modalités de chaque variable se rangent dans leur ordre naturel (croissant ou décroissant) le long de l'axe 1, ceci afin de vérifier si une telle variable suit *ou non* la liaison globalement linéaire du rendement avec ses divers facteurs.

Mais n'oublions pas que notre propos était également d'établir une hiérarchie des influences de ces variables sur les rendements. C'est ici que le calcul des contributions va être utile puisque celles-ci sont une estimation chiffrée de ces influences. Nous avons donc dressé le tableau 3 qui montre schématiquement les contributions des modalités aux forts et aux faibles rendements. Les distances entre modalité des variables sur ce schéma sont proportionnelles aux contributions.

Ce qui nous conduit à examiner séparément, en les confrontant, les variables les plus importantes quant à leur contribution aux fluctuations des rendements en racines de betteraves sur le périmètre.

3. — EXAMEN DES PRINCIPALES VARIABLES

3. 1. — *Variables intermédiaires*

3. 1.1. *Certaines variables liées* à la taille des betteraves, à leur densité, occupent une situation intermédiaire entre les variables du milieu et des techniques et les rendements, comme le soulignent GRAS *et al.* (1971) ; ces variables rendent partiellement compte de l'action des facteurs du milieu et des techniques.

Les résultats de l'analyse factorielle concernant ces variables sont portés sur la figure 15 ; ils montrent la relation entre le pourcentage de betteraves non marchandes (NM), le nombre de betteraves marchandes par station (BM), l'indice de dispersion I_D, et les rendements en racines TO. Le calcul des contributions des modalités de ces variables à l'inertie de l'axe 1 des rendements montre qu'elles jouent le rôle le plus

important pour l'exploitation des rendements (tabl. 3). Ces résultats concordent avec ceux de l'analyse en régression progressive que nous présenterons plus loin. Ils montrent que la variable pourcentage de betteraves non marchandes se classe en tête des facteurs responsables des variations de rendements dans les stations étudiées. L'indice de dispersion joue également un rôle important (14e contribution à l'explication des rendements faibles).

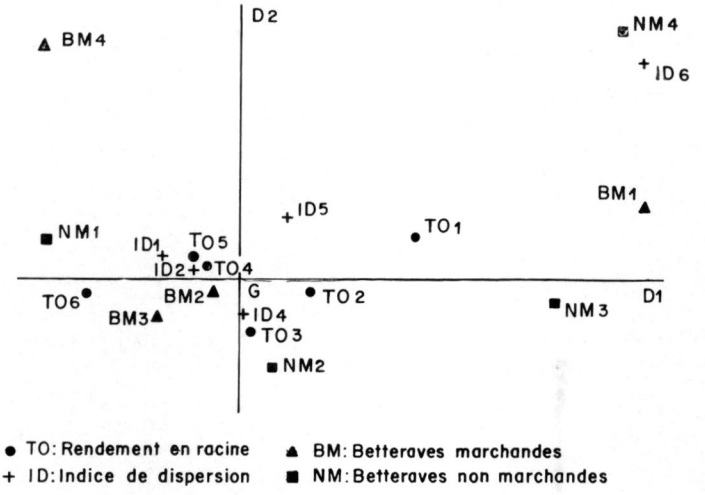


FIG. 15. — *Projections des modalités « composantes du rendement » et « rendement en racines » sur le 1er plan factoriel*

3. 1.2. *Analyse du nombre de betteraves marchandes.*

Étant donné l'importance du facteur taille des betteraves, nous avons effectué une analyse factorielle des correspondances pour « expliquer » le nombre de betteraves marchandes (> 45 mm) par station. Le fort nombre de betteraves marchandes correspond à un faible salissement par les mauvaises herbes (stations propres en juin), à une distribution régulière des betteraves sur la ligne ($0{,}13 < I_D < 0{,}3$), à une durée de végétation assez longue (174 à 198 j) et à un pourcentage d'argile situé entre 48 et 59 p. 100. Notons que deux de ces variables, la durée de végétation et l'indice de dispersion, dépendent des conditions d'installation de la culture : date et conditions de semis, de levée, densité des semis, conditions de démariage. Cette période d'installation apparaît donc déterminante pour la production.

3. 2. — *Variables physiques du sol*

L'analyse factorielle des correspondances a été effectuée sur l'ensemble des variables (granulométrie, tests de stabilité, perméabilité) qui caractérisent les propriétés physiques des sols. Nous n'avons pas pris en compte de variables (pédologique, vernaculaire) caractérisant globalement les sols.

Les résultats de la figure 16 indiquent :

— que les forts pourcentages d'argile semblent correspondre aux meilleurs rendements en racines de betteraves sur le périmètre ;

— que le test de stabilité après prétraitement à l'alcool et la perméabilité sont liées aux rendements. Le pourcentage d'agrégats stables à l'alcool possède la 18e contribution aux rendements forts (tabl. 3) et apparaît comme une condition importante de la production.

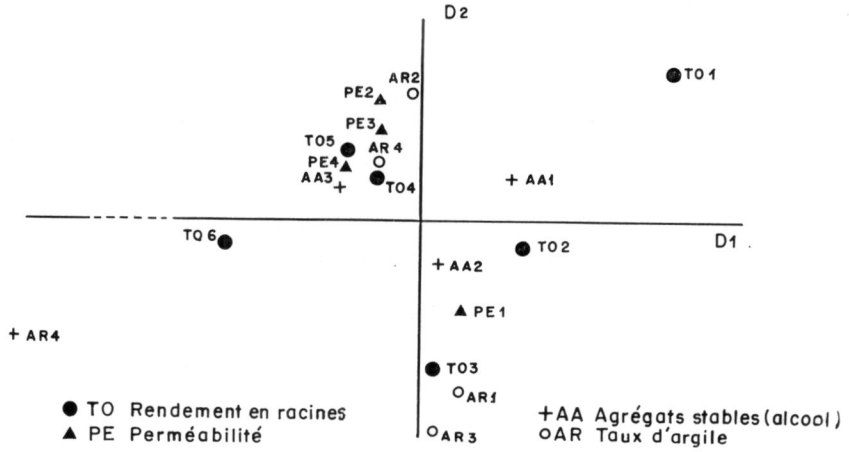


FIG. 16. — *Projections des modalités « variables physiques » et « rendement en racines » sur le 1er plan factoriel*

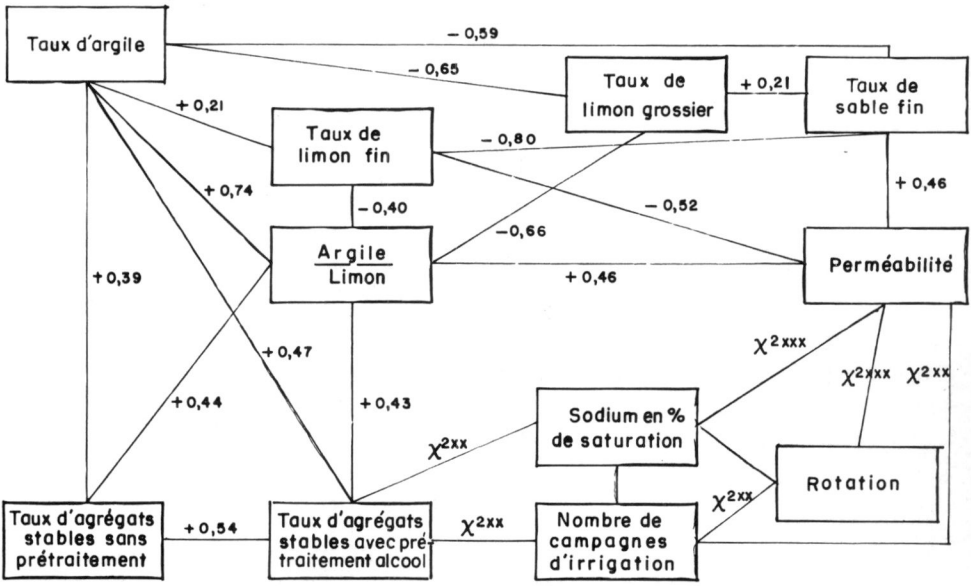


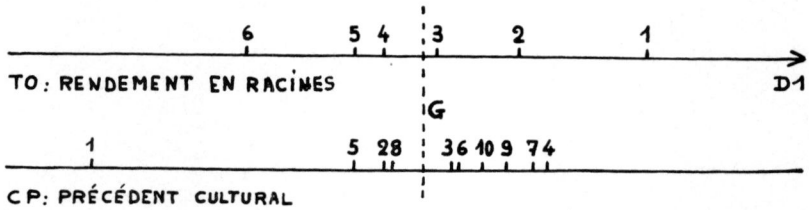
FIG. 17. — *Liaison entre les variables physiques du sol et d'autres facteurs du milieu*

L'examen des corrélations montre que ces différentes variables (fig. 17) ne sont pas indépendantes et confirme l'influence des teneurs en argile et en limon sur la stabilité structurale des sols. L'argile semble jouer le rôle le plus important dans la

stabilisation de la structure (test à l'alcool) alors que nous n'avons pas mis en évidence de corrélation entre les réserves organiques des sols et le test avec prétraitement au benzène. Ce résultat peut s'expliquer par la formation d'humates sodiques labiles qui ne joueraient pas de rôle dans la « stabilisation » de la structure. Ces hypothèses devraient être contrôlées expérimentalement à partir de modèles simplifiés, l'étude statistique ne pouvant rendre compte de la finesse des mécanismes mis en jeu dans les processus de stabilisation de la structure.

3. 3. — *Variables liées à la rotation*

L'analyse factorielle met en lumière la relation entre les rendements en racines, représentés comme nous l'avons vu par l'axe 1, et les différentes rotations (fig. 18). Le précédent vigne (dans ce cas, on ne peut parler de rotation) apparaît le plus favorable aux rendements en racines (28e contribution aux bons rendements sur le tabl. 3), suivi par la rotation céréale-fourrage-betterave et fourrage-céréale-betterave (le fourrage étant, dans les deux cas, la vesce-avoine).



DIFFÉRENTS PRÉCÉDENTS DE LA BETTERAVE			
	ANNÉE 1970 – 1971	ANNÉE 1969 - 1970	ANNÉE 1968 - 1969
CP1	BETTERAVES	VIGNE	VIGNE
CP2	"	BETTERAVES	CEREALES
CP3	"	CEREALES	BETTERAVES
CP4	"	BETTERAVES	FOURRAGES (ou jachère)
CP 5	"	FOURRAGES (ou céréales)	CEREALES (ou fourrages)
CP 6	"	JACHERE	CEREALES
CP 7	"	FOURRAGES	FOURRAGES
CP8	"	JACHERE	BETTERAVES
CP9	"	BETTERAVES	BETTERAVES
CP10	"	FOURRAGES	BETTERAVES

FIG. 18. — *Projections des modalités « précédents culturaux » sur le 1er axe factoriel* (rendement en racines)

Notons que 25 p. 100 des stations suivent la succession betterave-céréale-fourrage préconisée par les services techniques du périmètre.

Le choix d'une rotation entraîne plusieurs conséquences :

— les apports d'eau (chargée en sels) sont différents sur les parcelles ;

— les précédents influencent les dates de labour et de semis, donc la longueur du cycle végétatif des betteraves et le choix des variétés ;
— la présence d'adventices sur les parcelles, les attaques parasitaires, peuvent être conditionnées par la succession des cultures sur les stations.

Il résulte que les liaisons mises en lumière entre les rotations et les rendements peuvent masquer l'influence complexe d'autres facteurs, ce qui nous conduit à étudier plus finement ces facteurs en relations avec les rotations. Dans la suite de l'exposé, pour simplifier le problème, nous avons regroupé les 10 rotations pratiquées sur le périmètre en 5 grands types, le critère de regroupement choisi étant le nombre d'années séparant deux cultures betteravières sur une même parcelle.

3. 3.1. *Liaison rotation-salinisation.*

Le tableau 4 montre la liaison qui existe entre le type de rotation pratiqué et la conductivité de l'extrait 1/5 des sols.

On note que, lorsque la betterave « revient » fréquemment sur les parcelles, le degré de salinisation paraît plus élevé.

TABLEAU 4

Relations entre les rotations et la conductivité des sols

CO : conductivité (en mmhos) B : betteraves F : fourrage
RO : rotation C : céréales J : jachère

CO	RO					
	Vigne	B-C-F B-F-C	B-F-J B-C-J B-J-C	B-C-B B-F-B B-J-B	B-B-C B-B-F B-B-J	TOTAL
0,10 à 0,20	2	14	10	6	3	35
0,20 à 0,25	1	6	3	9	6	25
0,25 à 0,73	1	3	5	15	11	35
TOTAL	4	23	18	30	20	95

$\chi_2 = 18{,}6^{++}$
ddl = 8.

3. 3.2. *Liaisons précédent-date de labour-date de semis-rendements.*

Sur le tableau 5, nous avons porté les dates de labour et de semis les plus fréquentes correspondant aux différents précédents. On note que les précédents jachère ou vigne correspondent en général à des labours et des semis précoces, tandis que les

précédents céréales correspondent au contraire, à des labours et à des semis tardifs, effectués en hiver. Les relations sont moins nettes pour les autres précédents.

Sur le périmètre, les labours sont généralement effectués à la charrue à disques.

TABLEAU 5

Relation entre précédents, dates de labours et dates de semis

Précédents	Dates de labour	Dates de semis
Jachère (ou vigne) 22 stations	DL_1 14 stations DL_2 3 — DL_3 4 — DL_4 1 —	SE_1 10 stations SE_2 3 — SE_3 1 —
Betteraves 17 stations	DL_1 3 stations DL_2 2 — DL_3 10 — DL_4 2 —	SE_1 6 stations SE_2 2 — SE_3 2 —
Céréales 25 stations	DL_1 0 stations DL_2 1 — DL_3 14 — DL_4 10 —	SE_1 4 stations SE_2 0 — SE_3 10 — SE_1 1 — SE_2 4 — SE_3 5 —
Vesce Avoine 21 stations	DL_1 4 stations DL_2 9 — DL_3 6 — DL_4 2 —	SE_1 6 stations SE_2 2 — SE_3 1 — SE_1 0 station SE_2 3 — SE_3 3 —
Fourrages (autres que vesce-avoine) 10 stations	DL_1 0 station DL_2 1 — DL_3 8 — DL_4 1 —	SE_1 5 stations SE_2 1 — SE_3 2 —

L'étude des correspondances entre les *dates de labour* et les rendements indique que la plus mauvaise période pour labourer (qui correspond aux rendements les plus faibles) semblait être, en 1970, celle du 1er juin au 1er août. Les labours effectués avant le 1er juin correspondent aux meilleurs rendements en racines et aux stations qui ont le plus grand nombre de betteraves marchandes (> 45 mm) : 23 p. 100 des stations avaient été labourées avant le 1er juin en 1970. Les labours effectués avant l'été, dans de bonnes conditions d'humidité (le tabl. 6 montre qu'il était tombé 46 mm d'eau en mai 1970) semblent avoir permis l'action structurante de la sécheresse estivale ; les 27 mm de pluie, tombés au mois d'octobre (tabl. 6) ont favorisé, dans ce cas, la préparation des lits de semence. Au contraire, pour les labours tardifs, effectués en condition sèche, les semis semblent avoir eu lieu souvent en condition trop humide.

Les labours effectués avant le 1er juin supposent un précédent qui libère les parcelles assez tôt. Nous avons vu, sur le tableau 5, que les précédents jachère ou vigne et, à un degré moindre, vesce-avoine, permettaient des labours précoces.

TABLEAU 6

Pluviométrie durant la période de préparation du sol

Mois	Année 1970		Moyenne	
	Eau (mm)	Jours de pluie	Eau (mm)	Jours de pluie
janvier	57,5	8	76,1	8
février	10,1	1	65,5	8
mars	49,1	10	56,2	7
avril	53,1	6	39,6	6
mai	46,3	4	31,5	3
juin	0,0	0	10,8	2
juillet	2,1	1	1,6	—
août	0,0	0	—	—
septembre	0,0	0	22,0	3
octobre	27,5	7	43,5	5
novembre	2,2	1	58,7	6
décembre	50,0	7	73,9	9

L'analyse des correspondances montre que les *semis tardifs* (15 janvier-20 février) correspondent aux rendements les plus faibles (tabl. 3) ; par contre, en 1970-1971, la date de semis la plus favorable aux bons rendements correspondait à la période du 1er décembre au 15 janvier. Les semis tardifs semblent avoir été effectués dans de mauvaises conditions d'humidité. La betterave ayant une racine pivotante est très sensible aux discontinuités du profil que peut entraîner un mauvais travail du sol ; sur 37 stations semées tardivement, 23 ont plus de 18 p. 100 de betteraves fourchues. Sur le tableau 3, nous voyons que la modalité « 14-29 p. 100 de betteraves fourchues » correspond aux mauvais rendements.

TABLEAU 7

Influence du pourcentage de betteraves fourchues sur les rendements

Betteraves fourchues (%)	0-12 %	> 12 %
Rendements moyens (1) en racines	77	66
Nombre de stations	53	42

(1) Hypothèse d'égalité des moyennes rejetée au seuil 0,01.

Sur le tableau 7, on note que les rendements moyens en racines des stations possédant moins de 12 p. 100 de betteraves fourchues sont significativement supérieurs à ceux des stations ayant plus de 12 p. 100 de betteraves fourchues.

3. 3.3. *Liaisons variétés-rendements.*

Les services techniques du périmètre (CLAUS et LEGOUPIL, 1971) proposent un choix de variété en fonction des périodes de semis :

— pour les semis précoces, KWSAA (diploïde), à cycle végétatif semi long ;
— pour les semis moyens, Zwanpoly et Mégapoly (polyploïde) à cycle long et moyen ;
— pour les semis tardifs d'hiver, KWS Poly Bêta, variété à cycle court.

L'analyse des correspondances montre (tabl. 3) que Zwanpoly correspond aux bons rendements (13e contribution) alors que KWSAA correspond, généralement, aux faibles rendements (61e contribution).

Le classement des six variétés dénombrées sur le périmètre s'établit dans l'ordre :

1 : Zwanpoly (VA_1)	rendements forts
2 : Maribo Maroc Poly (VA_4)	rendements moyens
3 : Maribo Magna Poly (VA_6)	—
4 : Poly 2 (VA_3)	rendements moyens-faibles
5 : Poly Bêta (VA_5)	—
6 : KWSAA (VA_2)	rendements faibles

3. 3.4. *Liaisons cycle végétatif-rendement.*

La durée du cycle végétatif dépend de la date de semis et de la variété choisie. Ce cycle a été compté en jours, ce qui ne caractérise qu'imparfaitement le phénomène étudié, qui dépend, en fait, de la photopériode, des sommes de température...

L'analyse factorielle des correspondances indique que les faibles rendements correspondent à des cycles courts de 150 à 182 jours (10e contribution), tandis que les rendements élevés correspondent à des cycles longs de 222 à 245 jours. Ces premiers résultats seront confirmés par les analyses en régression.

3. 3.5. *Liaisons rotation-attaque de cassides-rendement.*

L'analyse factorielle n'a pas permis de mettre en évidence de pertes de rendements liées aux attaques de cassides. Il est possible que cela s'explique, en 1970-1971, par le fait qu'elles avaient eu lieu tardivement.

Sur le tableau 8, on note que la succession vigne-betteraves correspond à des attaques de cassides moyennes à fortes, les rotations triennales qui comprennent 2 cultures de betteraves paraissant plus fréquemment attaquées par la casside, mais les résultats ne sont pas nets (1).

(1) Une étude menée par un étudiant (FOURAR, 1973), dans le cadre du laboratoire de zoologie de l'I.N.A. d'El-Harrach, a permis de comparer expérimentalement l'efficacité de différents pesticides vis-à-vis de la casside. En outre, après mise au point d'une méthode d'échantillonnage et enquête, FOURAR a établi une carte d'infestation et montré que les résidus de betteraves (fanes + terre) pouvaient constituer des foyers d'infestation.

TABLEAU 8

Relations rotation-attaques des cassides

RO : rotation B : betteraves F : fourrage
C : céréales J : jachère V : vigne

	VB	BFJ BFF BCF BFC BCJ BJC	BCB BFB BJB BBC BBF BBJ	TOTAL
Absence d'attaque	0	27	30	57
Attaque moyenne à forte	4	14	20	38
TOTAL	4	41	50	95

$\chi_2 = 6{,}58^+$
ddl = 2

3. 3.6. *Liaisons rotation-enherbement-rendement.*

L'enquête a montré que 30 p. 100 seulement des stations étaient propres début avril. L'analyse factorielle montre (tabl. 3) que les bons rendements en racines correspondent aux stations propres en juin (36e contribution).

TABLEAU 9

Relations rotation-enherbement

Rotation 1 : Présence de betteraves au cours d'une des 2 années précédentes
Rotation 2 : Absence de betteraves au cours des 2 années précédentes
HA : Observation du début avril

HA	Rotation		
	1	2	TOTAL
Propre-peu sale	40	27	67
Sale à très sale	10	18	28
TOTAL	50	45	95

$\chi_2 = 4{,}55^+$
ddl = 1

Les désherbants ne sont pas utilisés sur le périmètre ; les désherbages sont effectués manuellement. Lorsque les domaines ont consacré toute l'attention nécessaire au désherbage (environ 36 jours de travail par hectare et par an), les rendements en racines ne sont jamais inférieurs à la moyenne.

Le degré de salissement, noté en avril, semble lié (tabl. 9) à la rotation. La présence d'une culture de betteraves, l'une des deux années qui précèdent la campagne étudiée, correspond plus fréquemment à des parcelles propres.

Le tableau 10 montre que le degré de salissement des stations est lié aux dates de labour. Les stations les plus sales sont labourées de juin à juillet ce qui correspond le plus souvent, comme nous l'avons vu (tabl. 5), au précédent vesce-avoine. Nous n'avons pas pris en compte dans notre étude les travaux superficiels après labour, et en particulier, les passages croisés de cover-crop qui constituent un moyen efficace de lutte contre les mauvaises herbes après les premières pluies d'automne.

TABLEAU 10

Relation date de labour-enherbement juin

DL : date de labour
HJ : mauvaises herbes en juin

HJ	DL				
	Février à mai 1970	Juin à juillet 1970	Août à octobre 1970	Novembre à décembre 1970	Total
Propre à peu sale	13	3	29	5	51
Sale à très sale	8	12	14	10	44
Total	21	15	43	15	95

$\chi_2 = 13{,}18^{++}$
dl = 3

3. 4. — *L'irrigation et la nutrition*

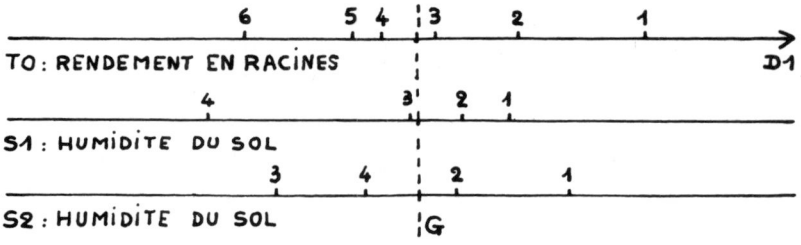
L'analyse des correspondances fournit une analyse des variables quantitatives (relatives à l'irrigation, à la nutrition) moins fine que les méthodes de régression. Dans un premier temps, nous nous contenterons d'exposer les résultats globaux obtenus en analyse des correspondances, ceux-ci seront examinés avec plus de précision ultérieurement.

3. 4.1. *L'irrigation.*

La durée des arrosages est théoriquement uniforme sur le périmètre et fixée à 10 heures. Les quantités d'eau apportées peuvent donc être considérées comme proportionnelles à la pluviométrie horaire des asperseurs, elle-même déterminée par la

pression d'utilisation. Cette pression d'utilisation nous a permis de constater que, en 1970-1971, la grande majorité des asperseurs fonctionnaient à une pression inférieure à celle, normale, d'utilisation. L'analyse des correspondances montre que le déficit de pluviométrie des asperseurs (par rapport aux normes) correspond aux mauvais rendements (65e contribution, tabl. 3).

Lorsqu'on considère la relation entre l'humidité des différents horizons avant et après irrigation, on remarque (tabl. 3) qu'une humidité sans excès des horizons 0-10 cm, avant et après irrigation, possède la 23e et la 24e contribution aux forts rendements, tandis qu'un fort déficit d'humidité de l'horizon 10-30 cm avant irrigation possède la 42e contribution aux faibles rendements en racines par station. La figure 19 montre la relation entre l'humidité du sol avant irrigation (horizon 0-10 et 10-30 cm) et les rendements. L'ordre des projections des modalités de la variable S^2 (humidité de l'horizon 10-30 cm après irrigation) nous paraît remarquable ; les modalités 1, 2 et 3 suivent la liaison linéaire entre les rendements en racines et l'ensemble des variables du milieu tandis que la modalité 4 est proche du centre de gravité G ; cette disposition permet de penser que pour la modalité 4, qui correspond aux plus fortes humidités de l'horizon 10-30 cm, il y a un effet dépressif de l'irrigation probablement lié à un excès d'eau.



S1 HORIZON 0-10cm		S2 HORIZON 10-30cm	
S11	14 à 33 % DE HE	S21	23 à 40 % DE HE
S12	33 à 52 % DE HE	S22	40 à 57 % DE HE
S13	52 à 71 % DE HE	S23	57 à 73 % DE HE
S14	71 à 90 % DE HE	S24	73 à 90 % DE HE

FIG. 19. — *Projections des modalités « humidité avant irrigation » sur le 1er axe factoriel* (rendement en racines)

3. 4.2. *La nutrition.*

Les sols du périmètre (fig. 8) possèdent de fortes teneurs en sodium. L'accumulation du sodium dans le sol s'accompagne d'un accroissement de la conductivité (extrait 1/5).

Une forte conductivité correspond à des rendements faibles (51e contribution).

Au niveau des feuilles, la salinisation du sol s'accompagne de fortes teneurs en Na, Mg et Ca.

Les fortes teneurs en sodium (9e contribution) et en calcium (16e contribution) correspondent à des rendements faibles en racines de betteraves, tandis que des faibles

teneurs en calcium et en magnésium dans les feuilles correspondent à des rendements en racines forts (44e et 41e contributions). La figure 20 montre les différentes liaisons entre les teneurs en Na, Mg, K et Ca dans les feuilles et les rendements. On remarque une relation inverse entre les teneurs en potassium des feuilles et les rendements. Notons que le potassium dans la plante provient *en partie* de l'eau d'irrigation (aspersion des feuilles). La relation globale potassium de la plante-rendement traduit, probablement, un effet global de la salinité de l'eau d'irrigation puisque l'eau d'irrigation contient 6 mg/l de potassium mélangé aux autres cations.

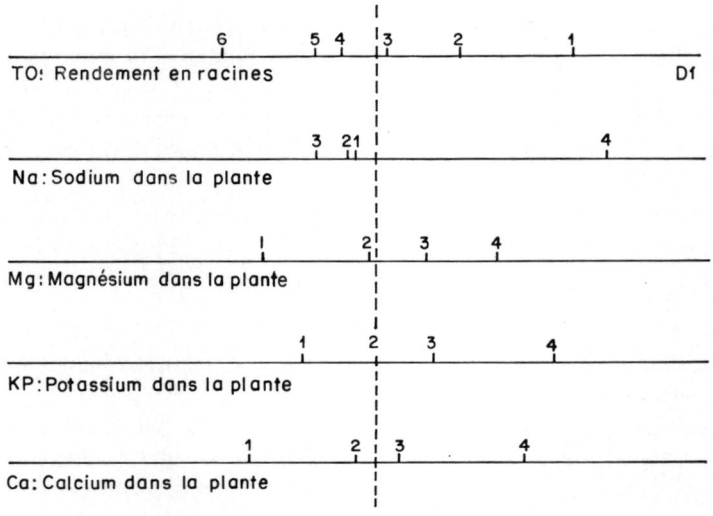


FIG. 20. — *Projections des modalités « teneurs en cations dans la plante » sur le 1er axe factoriel* (rendement en racines)

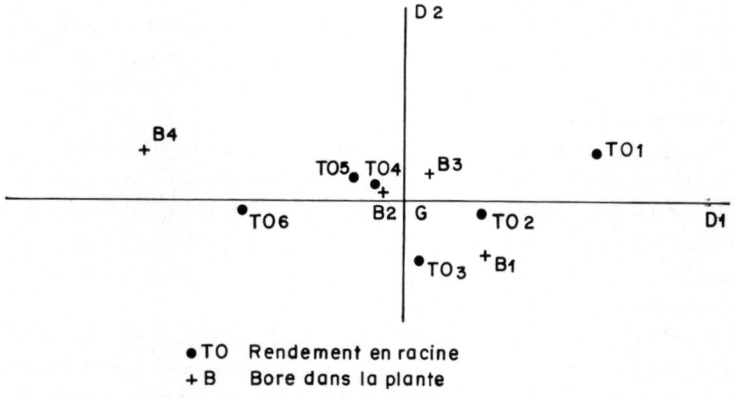


FIG. 21. — *Projections des modalités « rendement en racines » et « teneur en bore » sur le 1er plan factoriel*

Si l'on considère les équilibres entre éléments, on remarque (tabl. 3) qu'un rapport K/Ca > 3,1 correspond aux forts rendements (21e contribution).

En ce qui concerne les autres éléments de la nutrition, l'analyse des correspon-

dances n'a pas révélé d'effets particuliers liés à l'azote ; par contre, elle confirme la liaison forte entre le phosphore dans la plante et les rendements en racines. Les faibles teneurs en phosphore des feuilles possèdent la 25e contribution à l'explication des faibles rendements tandis que les fortes teneurs en phosphore des sols possèdent la 43e contribution (tabl. 3) à l'explication des forts rendements en racines (fig. 14).

L'effet de la nutrition en bore a été confirmé par l'analyse des correspondances (fig. 21) ; le bore joue un rôle important puisqu'il possède la 19e contribution aux rendements faibles.

Notons enfin le rôle du manganèse et celui du cuivre ; les rendements en racines les plus faibles correspondent aux fortes teneurs en manganèse (218-280 p.p.m.) dans les feuilles (tabl. 3). Au contraire, les forts rendements correspondent à des teneurs en cuivre dans les feuilles comprises entre 16-19 p.p.m. (27e contribution).

La contribution à la fluctuation des rendements des éléments liés à la nutrition explique que ces variables seront examinées en détail dans un prochain article.

4. — CONCLUSION

Notre travail se proposait plusieurs objectifs : pratiques, pédagogiques, méthodologiques.

Au niveau pratique, nous avons montré l'influence de plusieurs facteurs sur les rendements, en particulier des variables discrètes telles que le choix des variétés, le degré de salissement par les mauvaises herbes, le type de rotation, le niveau d'attaque par la casside. Il convient cependant de souligner les interrelations entre variables qui peuvent masquer ou biaiser certains résultats.

Ainsi, la liaison entre la variable « durée de végétation-rendement » aurait pu traduire une liaison « variété-rendement » si les variétés les plus productives étaient toujours semées tôt. En fait, nous avons montré que la variété KWSAA était moins productive que la variété Zwanpoly semée plus tard ; dans ce cas, on peut donc conclure qu'il y a effectivement une relation directe entre la longueur du cycle végétatif des betteraves et les rendements.

L'un des aspects intéressants de l'analyse des correspondances est de permettre un examen des variables liées à la rotation ; une enquête focalisée sur quelques variables dépendant de la rotation et répétée chronologiquement pendant plusieurs années devrait permettre de suivre, de façon dynamique, l'évolution du système cultural, en particulier le salissement des parcelles par les mauvaises herbes, la fertilité et la salinisation des sols, le parasitisme.

Au niveau méthodologique, l'analyse factorielle des correspondances permet un examen de *l'ensemble* des variables quantitatives (même si leur distribution n'est pas normale) et qualitatives. Il n'existe cependant aucun test qui permette de juger le degré de signification des liaisons mises en lumière par ce type d'analyse ; cependant, comme le souligne Benzécri (1973), lorsqu'il « convient de traiter simultanément des informations concernant le *plus grand nombre de dimensions*, le problème de la validité du test passe au second plan ». L'analyse factorielle fournit une approche descriptive et globale très utile avant d'aborder une analyse plus fine ; elle permet

une première appréciation de la contribution des variables aux fluctuations des rendements et par conséquent, le choix des plus importantes pour les analyses ultérieures que nous présenterons dans un prochain article.

Reçu pour publication en octobre 1975.

REMERCIEMENTS

Nous remercions MM. BEFZAGHOU, Directeur de la Production Végétale et TAMZALI, Responsable du Commissariat de la mise en valeur du Haut Chéliff, au Ministère de l'Agriculture à Alger, ainsi que MM. J. P. BENZÉCRI, Professeur de Statistique à l'Université de Paris VI, et R. GRAS, Maître de Recherches à la Station d'Agronomie d'Antibes (I.N.R.A.) pour l'aide et les conseils qu'ils nous ont apportés.

SUMMARY

GLOBAL STUDY OF SUGAR-BEET CULTIVATION IN THE AREA OF THE UPPER CHELIFF. I. — FACTORIAL ANALYSIS OF CORRESPONDENCES

The global study of the relations between the sugar-beet yields and the variables (which are specific of the environment, techniques or plants) allows to bring out the factors responsible for the production fall. It raises the problem of the simultaneous statistical analysis of the discrete and continuous variates. In a first stage the factorial analysis of correspondences revealed the relations between the root yield and the dependent variables connected, with soil physics (in particular with the structure stability), crop rotation (tilling period, soil salinization, choice of the varieties) and with nutrition (water, phosphorus, boron and cations such as Ca, Mg, Na and K).

ZUSAMMENFASSUNG

GESAMTUNTERSUCHUNG DER ZUCKERRÜBEKULTUR IM GEBIET DES OBERCHELIFFS. I. — FAKTORIELLE ANALYSE DER KORRESPONDENZEN

Die Gesamtuntersuchung der Verhältnisse zwischen den Zuckerrübeerträgen und den Variablen (die die Umwelt, die Techniken oder die Pflanzen bezeichnen) führt zur Entdeckung der Faktoren, die die Produktion vermindern. Es steht das Problem der gleichzeitigen statistischen Behandlung der diskreten und kontinuierlichen Variablen. In einem ersten Stadium liess die faktorielle Analyse der Korrespondenzen die Verhältnisse zwischen den Wurzelerträgen und den abhängigen Variablen erkennen, die mit Bodenphysik (insbesondere Strukturfestigkeit), Fruchtfolge (Pflügenzeit, Bodenversalzung, Sortenauswahl) und mit der Ernährung (Wasser, Phosphor, Bor und verschiedene Kationen wie Ca, Mg, Na und K) verbunden sind.

РЕЗЮМЕ

Общее изучение культуры сахарной свеклы в периметре Высокогорного Шелиффа. — I. Факториальный анализ соответствий.

А. П. КОНЕЗА, М. РУ, П. БАЙОН, Д. ХАДЖ-МИЛУД, К. МАЖИНИО, Г. ЛЕМЭР.

Общее изучение соотношений существующих между урожайностью сахарной свеклы и переменными величинами, характеризующими среду, технологию культуры, или сами растения, позволяет лучше осветить факторы способствующие уменьшению продукции. Оно также ставит задачу одновременной статистической обработки переменных, как скрытых, так и постоянных, величин. Факториальный анализ соответствий выявляет в первую очередь существование соотношения между урожаем корнеплодов и об'яснительными переменными, связанными с физикой почв (в особенности с прочностью структуры), севооборотом (эпоха вспашки, засоление почвы, выбор сортов) и питанием растений (вода, фосфор и катионы, как например Ca, Mg, Na и K).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Benzécri J. P. *et al.*, 1973. *L'analyse des données.* II. *L'analyse des correspondances.* Dunod, 617 p.

Boulaine J., 1956. *Carte des Sols d'Algérie. Plaine du Chéliff.* Échelle 1/50 000 e.

Clauss R., Legoupil J. C., 1971. Le milieu du Haut Chéliff et ses implications agronomiques. *Bull. Rech. agron., Gembloux. Semaine d'Étude des problèmes méditerranéens*, 175 p.

Conésa A. P., Maginieau C., Dumartin J. J., Roux M., Lemaire G., Baillon P., Hadj Miloud D., 1972. A study of the salinization of the soil through the mean of the survey method in the irrigated area of the Upper Cheliff. *Symposium of the subcommission on salt affected soils of the Intern. Soil Sci. Soc.*, Le Caire.

Cordier B., 1965. *L'analyse factorielle des correspondances.* Thèse de 3e cycle, 66 p., Rennes.

Deffontaines J. P., Gras R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en Moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19** (1), 5-51.

Gras R., 1971. Utilisation de l'enquête globale pour l'approche d'un problème agronomique régional. *Séminaire fertilisation et développement agricole*, 63-73, I.N.A., El-Harrach.

Gras R., Osty P. L., Deffontaines J. P., Marin la Flèche A., 1971. Contribution à l'étude de la culture de la Betterave à sucre sur des sols légers du Laonnais et de la Champagne de l'Aisne. *Ann. agron.*, **22** (5), 537-584.

Greig Smith, 1964. *Quantitative plant ecology.* Butterworths ed.

Hénin S., Gras R., Monnier G., 1969. *Le Profil Cultural.* Masson Éd.

Joret G., Hébert J., 1955. Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. agron.*, 233-299.

Ulrich A., 1959. Plant Analysis : a guide for sugar beet fertilization. *Calif. Agric. Exp. Stn. Bull.*, **766**, 11-23.

Ann. agron., 1975, **26** (6), 741-744.

CHRONIQUE DES LIVRES

QUENEY (P.). — ÉLÉMENTS DE MÉTÉOROLOGIE. — Paris, Masson et Cie, 1974, 312 p., 155 figures.

Le développement accéléré de la météorologie depuis un quart de siècle a entraîné une importance croissante de cette science parmi les autres disciplines faisant l'objet d'enseignements universitaires ou techniques, mais il en est résulté aussi une nette insuffisance des ouvrages d'ensemble correspondants. En effet les météorologistes ont été conduits à se spécialiser, donc à publier de préférence dans des périodes ou dans des traités eux-mêmes spécialisés à caractère assez souvent technique, et d'autre part les ouvrages généraux, peu nombreux et parus surtout aux U.S.A., ont pour la plupart été assez vite dépassés par les progrès des données aérologiques et des théories. Dans ces conditions un manuel de météorologie générale, constituant une sorte de synthèse des résultats les plus importants relatifs à l'atmosphère, y compris les plus récents, apparaît aujourd'hui indispensable non seulement aux étudiants des universités et aux candidats à une carrière météorologique, mais plus généralement à tous ceux dont l'activité a quelque rapport avec la science de l'atmosphère : ingénieurs hydrographes ou océanographes, climatologues, géographes, agronomes, etc.

L'ouvrage ici présenté a été conçu pour répondre au moins partiellement à ce besoin, et afin qu'il ne soit pas trop volumineux ni surtout trop encombré de développements mathématiques plus ou moins ardus, on l'a volontairement réduit à ce qui est actuellement enseigné en météorologie pour le Certificat de Géophysique Externe de l'Université de Paris-VI, complété toutefois (en petits caractères dans le texte) par diverses informations de nature technique et quelques justifications de formules. Sous cette forme il peut aussi servir de manuel de base pour les candidats à un DEA de météorologie (certificat de troisième cycle), et il est également adapté au cours de météorologie donné à l'École nationale supérieure des Techniques avancées.

Après une introduction historique, un premier chapitre traite brièvement des méthodes courantes d'observation, puis viennent successivement une description de la structure générale de l'atmosphère, une étude des processus thermodynamiques les plus importants qui s'y produisent. Un chapitre sur l'approximation hydrostatique, et un autre (relativement très développé) sur les phénomènes radiatifs. Le reste de l'ouvrage est consacré aux propriétés des mouvements atmosphériques de diverses échelles et aux théories relatives à certains d'entre eux, une importance particulière étant donnée à l'étude de la circulation générale et des perturbations cycloniques.

On ne donne que des informations très générales sur la très haute atmosphère et sur les phénomènes encore très mal expliqués ; les détails techniques sont réduits au minimum indispensable, et les théories sont de préférence présentées sous la forme de schémas aussi dépouillés que possible d'appareil mathématique, mais permettant néanmoins de saisir l'essentiel des raisonnements ainsi que le degré de probabilité des conclusions.

L'usage de l'ouvrage est facilité par le rappel des lois classiques de physique ou d'hydrodynamique qui sont utilisées, avec les valeurs de constantes physiques actuellement adoptées, et des graphiques ou tables numériques correspondantes.

Grandes divisions de l'ouvrage :

I. — Observations météorologiques courantes ;
II. — Structure générale de l'atmosphère ;
III. — Thermodynamique de l'atmosphère ;
IV. — Approximation hydrostatique ;
V. — Phénomènes radiatifs ;
VI. — Hydrodynamique de l'atmosphère ;
VII. — Mouvements de petite ou moyenne échelle ;
VIII. — Mouvements de grande échelle.

An. éd.

COSTES (C.), éd. — PHOTOSYNTHÈSE ET PRODUCTION VÉGÉTALE. — Gauthier-Villars, 1975, 284 p.

(Collection « Formation permanente en écologie et biologie »).

Cet ouvrage rassemble une série de conférences sur la photosynthèse, faites au cours d'un séminaire organisé en mars 1974 par C. COSTES à l'Institut national agronomique, Centre de Grignon.

L'ensemble des textes est articulé de façon à faire passer progressivement le lecteur des aspects fondamentaux (structure des chloroplastes, photochimie et métabolisme de la photosynthèse et de la photorespiration, translocation des produits) à l'utilisation de ces connaissances dans le traitement de certains problèmes actuels (pollution atmosphérique, production forestière, production marine).

Table des matières

R. BOURDU. — Structure et développement des chloroplastes.
C. COSTES. — Processus photochimiques et conversion énergétique de la lumière dans la feuille.
M. L. CHAMPIGNY. — Les phosphorylations photosynthétiques.
E. JOLIVET. — Les carboxylations photosynthétiques.
A. MOYSE. — La photorespiration.
J. L. BONNEMAIN. — Transport et distribution des produits de la photosynthèse.
Ph. CHARTIER. — L'assimilation du CO_2 à l'échelle de la feuille et à celle de la culture.
B. MONTIES. — Rayonnement ultraviolet et photosynthèse.
G. AUSSENAC, H. BOUCHON, M. DUCREY. — La production photosynthétique forestière.
G. GIRAUD. — La production photosynthétique des algues marines.
L. DE CORMIS. — Pollution de l'air et photosynthèse.

An. Éd.

ZIMMERMAN (U.), DAINTY (J). — MEMBRANE TRANSPORT IN PLANTS. — Springer Verlag, Berlin, 1974, 473 p.

Cet ouvrage est le compte rendu du « Colloque international sur les transferts membranaires dans les plantes » qui a eu lieu au Centre de Recherches nucléaires de Jülich (Allemagne fédérale) en février 1974.

Le thème du Colloque recouvre largement diverses branches dont la thermodynamique des processus irréversibles, les relations hydriques, les réactions primaires en photosynthèse et tous les aspects traditionnels du transport à travers les membranes.

Une soixantaine de communications y ont été présentées et regroupées en neuf séances :

— thermodynamique et électrochimie du transport à travers les membranes ;
— transfert hydrique et processus osmotique ;
— propriétés électriques des membranes ;
— transfert de solutés dans des cultures d'algues ou de cellules en suspension ;
— transfert dans les chloroplastes isolés ;
— A.T.P. ases et transfert ;
— cinétique des transferts ;
— transfert au sein d'organes dans les plantes supérieures ;
— facteurs de régulation des transferts membranaires.

Le but de ce Colloque était de présenter et de discuter les nouveaux concepts thermodynamiques en matière de transfert membranaire, auprès des biologistes et des physiciens chimistes. Le chercheur physiologiste sera intéressé par l'exposé de ces travaux.

L. D.

DE WIT(C. T.), GOUDRIAN (J.). — SIMULATION OF ECOLOGICAL PROCESSES. — Pudoc, Wageningen, 1974, 159 p.

Ce troisième volume paru dans la série « Simulation monograph » relative à l'Agriculture et ses sciences connexes, traite des analyses et des simulations sur ordinateur de l'état des écosystèmes.

Il s'agit d'un manuel d'enseignement, d'excellent niveau et de présentation très pédagogique ; chaque chapitre comprend des exercices dont les solutions sont regroupées en fin d'ouvrage.

Les exemples traités vont du simple modèle de croissance exponentielle à l'épidémiologie des plantes en passant par la compétition des plantes en cultures associées, la compétition au sein de populations de protozoaires, les problèmes de développement et d'âge physiologique, les modèles d'évolution démographique, la sporogenèse. Ils sont choisis parmi les résultats de recherches qui ont été menées par des étudiants et des chercheurs issus de diverses Universités : Agricultural University (Wageningen), University of Nijmegen, Hebrew University (Jerusalem) et Connecticut Agricultural Experiment Station (New Haven U.S.A.).

Le langage de simulation choisi est le C.S.M.P. (continuous system modelling program, I.B.M.) très couramment utilisé et dont la compréhension ne nécessite *a priori* aucune connaissance technique de programmation. Le niveau mathématique requis est suffisamment simple pour que l'ouvrage soit accessible à des biologistes non mathématiciens et l'écologie est traitée de façon telle que les mathématiciens ne se sentent pas égarés.

Cet ouvrage est essentiel et indispensable à connaître, pour tous les écologistes soucieux de modélisation, qui souhaitent, sur des bases claires, approfondir leurs travaux dans ce domaine.

L. D.

ETHERINGTON (J. R.). — ENVIRONMENT AND PLANT ECOLOGY. — Wiley J., London, 1975, 364 p.

Le présent ouvrage traite des relations entre les fonctions physiologiques des végétaux et leur environnement. L'écosystème est étudié en termes d'interactions multiples entre l'environnement et les organismes végétaux, en examinant successivement les échanges énergétiques, les cycles élémentaires et les systèmes de régulation, tant à l'échelle du comportement individuel des espèces que du comportement compétitif entre espèces. Les exemples présentés, issus de la bibliographie, sont repris d'études expérimentales au champ mais aussi en conditions contrôlées.

L'auteur est professeur de botanique à « University College of South Wales (Cardiff) et son collaborateur ARMSTRONG W., auteur du chapitre « Sols marécageux » est professeur de botanique à « University of Hull ».

L'ouvrage se divise en dix chapitres :

1° Origine et développement de l'écologie végétale.
2° Échanges énergétiques et productivité.
3° Sols.
4° Propriétés physiques et chimiques des sols. L'environnement racinaire.
5° Plantes et déficit hydrique : aspects physiologiques.
6° Plantes et déficit hydrique : aspects écologiques.
7° Sols marécageux.
8° Nutrition minérale.
9° Cycle biogéochimique et écologie de la nutrition minérale.
10° Compétition.

De niveau introductif, il s'adresse aux étudiants en écologie, aux enseignants. Il occupera une place honorable, au titre de référence, dans la bibliothèque des spécialistes écophysiologistes, agronomes.

Une bibliographie abondante, plus de 600 références, fait de ce livre un document de revue bibliographique important.

Il est cependant à regretter qu'à un tel niveau de généralités, l'auteur n'ait pu citer, de façon séparée, les principaux ouvrages similaires ou complémentaires, pour lesquels certaines lacunes existent, tant en ouvrage de langue française (aucun n'est cité, par exemple, LEMÉE, 1967 ; DAJOZ, 1970), qu'en langue anglaise (ROSE, 1967 ; REICHLE, 1970 ; ELLENBERG, 1971 ; LEVITT, 1972 ; MONTEITH, 1973 ; WANG, 1973). KOZLOWSKI (1968) aurait aussi mérité sa place à part entière (et pas seulement la citation du chapitre d'un autre auteur isolé).

Malgré ce léger défaut, l'ouvrage sera très apprécié des milieux d'enseignement et de recherche, sous réserve qu'il soit complété par d'autres manuels.

M. C. D. et L. D.

DUCHAUFOUR (Ph.). — ATLAS ÉCOLOGIQUE DES SOLS DU MONDE. — Paris, Masson, 1976, 192 p., 20 pl.

Cet ouvrage est d'abord un complément du « Précis de pédologie » (édition 1970), publié par l'auteur chez le même éditeur. Un des objectifs de l'Atlas de sols vise en effet à compléter le précis, en présentant une gamme aussi complète de profils pédologiques (plus de cent), choisis parmi les

plus caractéristiques, dans des milieux aussi variés que possible, et sous tous les types de climat (froid, tempéré, tropical, steppique, etc.). Chaque fiche descriptive et analytique, rédigée de façon aussi condensée que possible tout en étant complète, est illustrée par une photographie en couleur du profil étudié.

Mais cet ouvrage poursuit un autre but : il constitue un ensemble cohérent, donc indépendant du précis de pédologie, visant à préciser une méthode entièrement nouvelle de l'étude des sols, la méthode écologique. Cette méthode propose d'améliorer les classifications existantes, en mettant davantage l'accent sur l'évolution écologique des profils.

Grandes divisions de l'ouvrage.

— Objet et méthodes :
  Objet de l'ouvrage ;
  Méthodes de présentation des profils ;
— Bases d'une classification écologique :
  Notion de climat du sol, base d'une classification écologique ;
  Écologie et évolution des sols ;
— Sols peu évolués et à profil peu différencié :
  Sols peu évolués d'érosion ou d'apport ;
  Sols humifères désaturés à profil peu différencié ;
— Sols calcimagnésiques :
  Sols calcimagnésiques très humifères (montagne) ;
  Sols calcimagnésiques humifères, rendzines ;
  Sols calcimagnésiques modérément humifères ;
— Sols isohumiques et vertisols :
  Sols isohumiques à évolution bioclimatique ;
  Sols à pédogenèse conditionnée par la station : vertisols ;
— Sols brunifiés et sols lessivés :
  Évolution des sols brunifiés en climat atlantique ;
  Évolution des sols lessivés boréaux.

An. Éd.

VINK (A. P. A.). — LAND USE IN ADVANCING AGRICULTURE. — Advanced series in agricultural sciences, Vol. 1, Yaron B. *et al.*, éd. Springer Verlag, Berlin, 1975, 394 p.

Cet ouvrage est le premier d'une nouvelle collection intitulée « Advanced series in agricultural sciences ». Il fait le point sur les relations entre l'utilisation des sols par l'homme et les ressources terrestres.

En effet l'homme, bien qu'il fasse partie de l'écosystème dans lequel il vit, se place en dehors de ce système pour essayer de le manipuler. Il peut le faire d'une manière intensive, comme en Europe de l'ouest et dans les rizières d'Asie par exemple, ou de façon très extensive à la manière des peuples semi-nomades d'Afrique.

L'exploitation rationnelle des sols permet de maintenir un bon équilibre écologique, tout en satisfaisant les demandes de la société.

Pour obtenir de très bons résultats, l'utilisation et la gestion du sol doivent être bien adaptées aux ressources terrestres mais aussi aux conditions écologiques. Pour réaliser des progrès dans cette voie, il faut mettre en œuvre des méthodes variées de recherche, notamment pour améliorer la qualité des sols.

L'auteur présente et analyse de nombreux exemples locaux d'aménagement des sols. Leur situation géographique est très variée, notamment en Europe de l'ouest (Pays-Bas), au Moyen-Orient (Irak), en Afrique centrale.

L'ouvrage se divise en 7 chapitres :

1° Historique et potentialités de l'aménagement des sols ;
2° Inventaire des sols ;
3° Types d'exploitation des sols ;
4° Ressources naturelles (en agriculture) ;
5° Écologie et caractéristiques des terres cultivées ;
6° Évaluation des sols ;
7° Développement de l'utilisation des sols en agriculture de pointe.

L'ouvrage se termine par une bibliographie développée et un index-matière. Il est illustré de nombreuses photos et schémas.

M. C. D.

Ann. agron., 1975, **26** (6).

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1975

A. Baille. — Étude de l'influence du positionnement des aérations sur les champs de température et de vitesse à l'intérieur des tunnels de semi-forçage 265

J. L. Ballif, P. Dutil. — Le réchauffement des sols de craie par films plastiques. Mesures et bilans thermiques 159

Denise Blanc. — Étude de la nutrition en bore de l'œillet américain 327

Anne-Marie Blondel, Denise Blanc. — Accidents végétatifs sur agrumes en Corse. Mise en évidence d'une carence en molybdène par utilisation du test de mesure *in vivo* de l'activité de la nitrate réductase 277

Anne-Marie Blondel, Denise Blanc. — Mise au point d'une méthode de mesure *in vivo* de l'activité de la nitrate réductase. Possibilités d'applications agronomiques en matière de diagnostic 309

J. Boiffin, M. Sebillotte et Camille Duby. — Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs-grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée 555

R. Calvet, Martine Tercé. — Adsorption de l'atrazine par des montmorillonites Al 693

Simone Chevalier et Claire Huguet. — Effets d'une déficience en magnésium chez le Pommier. Évolution des ultrastructures de la feuille de pommier carencé 351

A. P. Conésa, M. Roux, P. Baillon, D. Hadj-Miloud, C. Maginieau, G. Lemaire. — Étude globale de la culture de la Betterave à sucre sur le périmètre du Haut-Chéliff. I. — Analyse factorielle des correspondances .. 709

P. Cornillon, J. P. Ley. — L'aubergine (*Solanum melongena* L.). Influence de la nature du substrat sur le comportement de la plante 593

C. Courpron, C. Juste. — Influence de l'incorporation de certaines formes de matières organiques sur le pouvoir chlorosant d'un sol calcaire 215

J. de Crécy. — Dessèchement et réhumectation des pâtes argileuses : unification des résultats 651

J. P. Fortin, B. Seguin. — Estimation de l'ETP régionale à partir de l'ETP locale : utilisation de la relation de Bouchet à différentes échelles de temps 537

J. C. Latché, M. Piquemal. — Variations des teneurs en acides aminés, amides et acides organiques dans les composts de culture d'*Agaricus bisporus* lge, en fonction de la production de carpophores 199

G. LEFÈVRE. — Minéralisation de l'azote d'un sol de limon soumis à la percolation lente de solutions azotées 337

F. LEMAIRE. — Action comparée de l'alimentation azotée sur la croissance du système racinaire et des parties aériennes des végétaux 59

P. LOISEAU, G. BECHET. — Implications agronomiques de la sélection alimentaire exercée par les Ovins sur les constituants d'une végétation pâturée 289

J. MAMY. — Les phénomènes de diffraction des rayonnements X et électroniques par les réseaux atomiques : applications à l'étude de l'ordre cristallin dans les minéraux argileux. *Première partie :* La nature des diagrammes de diffractions X et électroniques des minéraux argileux ; leur observation expérimentale 625

J. MORIZET, M. ROBELIN. — Évaluation de la poussée radiculaire. Confrontation des résultats avec les données de la théorie osmotique. Calcul de la conductivité de la racine pour l'eau 125

A. PERRIER. — Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. I. — Évaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles .. 1

A. PERRIER, B. ITIER, J.-M. BERTOLINI, A. BLANCO DE PABLOS. — Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application .. 19

A. PERRIER. — Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. II. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface « mince » 105

A. PERRIER. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. VI. — Étude de la température de la surface du sol sous culture 139

A. PERRIER. — Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. — Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux 229

R. PROST. — Étude de l'hydratation des argiles : interactions eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau. I. — Étude d'une zéolite (la natrolite) et de deux minéraux fibreux (attapulgite et sépiolite) 401

R. PROST. — Étude de l'hydratation des argiles : Interactions eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau. II. — Étude d'une smectite : (hectorite). 463

M. ROBERT. — Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Problèmes particuliers posés par les minéraux argileux les plus fréquents dans les sols des régions tempérées 363

B. SEGUIN. — Étude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (région d'Avignon) 671

Ginette SIMON-SYLVESTRE, J. CHABANNES. — Incidences de quelques techniques culturales sur certaines propriétés du sol : répercussions sur une culture de maïs 75

Nicole SOUTY, R. GUENNELON, Colette RODE. — Quelques observations sur l'absorption du potassium, du rubidium-86 et du césium-137 par des plantes cultivées sur solutions nutritives 41

R. SPECTY. — Étude des effets cumulés et des arrière-effets de plusieurs facteurs agronomiques appliqués dans le cadre de rotations possibles dans la Hardt irriguée. I. — Résultats partiels sur cultures de maïs grain .. 169

C. VARLET GRANCHER. — Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables 245

Chroniques des livres 101, 323, 717, 741

CONTENTS

A. BAILLE. — Study of the effect of aeration holes positioning on temperature and velocity inside semi-forcing tunnels 265

J. L. BALLIF, P. DUTIL. — The warming up of chalk soils by plastic films. Thermic measurements and evaluations 159

Denise BLANC. — Study of the American pink's boron nutrition 327

Anne-Marie BLONDEL, Denise BLANC. — Vegetative disorders on citrus in Corsica. Molybdenum deficiency showed up *in vivo* assay of nitrate reductase activity 277

Anne-Marie BLONDEL, Denise BLANC. — An improved procedure for the *in vivo* assay of nitrate reductase activity. Possible agronomical use in diagnosis 309

J. BOIFFIN, M. SEBILLOTTE, Camille DUBY. — Influence of ecological conditions and cultural past on the yield of grain maize. Analysis of 8 trials of a long-term experiment 555

R. CALVET, Martine TERCÉ. — Adsorption of atrazine on aluminium saturated montmorillonites 693

Simone CHEVALIER, Claire HUGUET. — Magnesium deficiency effects on apple-trees. Ultrastructural evolution in deficient leaves of apple-trees 351

A. P. CONÉSA, M. ROUX, P. BAILLON, D. HADJ-MILOUD, C. MAGINIEAU, G. LEMAIRE. — Global study of sugar-beet cultivation in the area of the Upper Cheliff. I. Factorial analysis of correspondences 709

P. CORNILLON, J. P. LEY. — The egg-plant (*Solanum melongena* L.). Influence of the nature of the substrat on the plant behaviour 593

C. COURPRON, C. JUSTE. — The effect of the incorporation of certain forms of organic matter on the chorotis capacity of a chalky soil 215

J. DE CRÉCY. — Drying and rewetting of clay-pastes : standardization of results 651

J. P. FORTIN, B. SEGUIN. — Estimation of regional evaporation from local potential evapotranspiration : use of Bouchet's relation at different time scales 537

J. C. LATCHÉ, E. PIQUEMAL. — Variations in the amino acid, amide and organic acid content of *Agaricus bisporus* LGE crop composts with respect to carpophore production 199

G. LEFÈVRE — Nitrogen mineralization of a silty soil subjected to the slow percolation of nitrogenous solutions 337

F. LEMAIRE. — The comparative action of nitrogen supply on the growth of the root system and aerial parts of plants 59

P. Loiseau, G. Bechet. — Agronomic implications of the alimentary selection exercised by sheep on the constituents of a grazing-pasture vegetation.. 289

J. Mamy. — Diffraction of X-rays and electrons by atomic lattices : application to the study of crystal order in clay minerals. *First part :* The nature of X ray and selected area diffraction patterns of montmorillonite ; their experimental observation 625

J. Morizet, M. Robelin. — Estimate of root pressure. Comparison of the results with the osmotic theory data. Calculation of the roots' water conductivity 125

A. Perrier. — Physical study of evapotranspiration in natural conditions. I. — Energy balance of natural surfaces and evaporation..... 1

A. Perrier, B. Itier, J.-M. Bertolini, A. Blanco de Pablos. — Automatic measurements of the energetic balance of a crop. Application exemples 19

A. Perrier. — Physical study of evapotranspiration in natural conditions. II. — Formulations and parameters for actual evapotranspirations of a thin surface..... 105

A. Perrier. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. VI. — Soil surface temperature study beneath canopy..... 139

A. Perrier. — Physical study of evapotranspiration in natural conditions. III. — Actual and potentiel evapotranspiration of canopies..... 229

M. Prost. — Study of clay hydration : the water-mineral interactions and the water retention mechanism. I. — Study of a zeolite (natrolite) and of two fibrous minerals (attapulgite and sepiolite)..... 401

R. Prost. — Study of clay hydration : the water-mineral interactions and the water retention mechanism. II. — Study of a smectite (hectorite)..... 463

M. Robert. — Principales of qualitative determination of clay minerals by X-rays. Special problems presented by the most common clay minerals in the soils of temperate regions..... 363

B. Seguin. — A comparative study of estimation methods of potential evapotranspiration in mediterraneen climate of the south of France (Region of Avignon) 671

Ginette Simon-Sylvestre, J. Chabannes. — The effects of some techniques of cultivation on certain properties of the soil : the consequential effects on a maize crop..... 75

Nicole Souty, R. Guennelon, Colette Rode. — Some observations on potassium, rubidium-86 and caesium-137 absorption by plants grown on nutritive solutions 41

R. Specty. — Study of the accumulative effects and after effects of several agronomical factors applied within the framework of rotations possible in the irrigated Hardt region. I. — Incomplete results on maize crops.... 169

C. Varlet Grancher. — Variation and estimation of the solar energy incident upon planes of different orientations..... 245

Books reviews 101, 323, 717, 741

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ;* le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos : 9 × 12 ; 4 photos : 9 × 5,5 ; 6 photos : 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Chaussidon (Science du Sol) ou M. Hallaire (Bioclimatologie), Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles (France), ou M. Gachon (Agronomie), Centre de Recherches de Clermont-Ferrand, 12, avenue de l'Agriculture, 63100 Clermont-Ferrand (France). On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner après correction à la Station de Science du Sol, C. N. R. A., Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (Mme Boniface).

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1976

Dépôt légal : 2e trimestre 1976. N° d'impression : 659

CPPAP n° 26017